

Oppiaine	Laskentatoimi ja rahoitus	Päivämäärä	12.12.2018
Tekijä(t)	Helka Kärkkäinen	Matrikkelinumero	507648
		Sivumäärä	123
Otsikko	Hintakuplat kryptovaluutoissa, Bitcoinin, Litecoinin, Ethereumin ja USD/EUR-kurssin hintakuplien havaitseminen GSADF-menetelmällä		
Ohjaaja(t)	Mika Vaihekoski ja Valtteri Peltonen		

Tiivistelmä

Vuodenvaihte 2017–2018 oli kryptovaluuttojen kannalta merkityksellinen hintojen radikaalin nousun ja sitä seuraavan romahduksen takia, jonka seurauksena hintakuplista kryptovaluutoissa alettiin puhua yhä enemmän. Tutkielmassa tarkastellaan Bitcoinin, Ethereumin ja Litecoinin aikasarjoissa esiintyviä hintakuplia aikaväliltä 2015–2018 GSADF-menetelmällä. Tutkielma sisältää myös pidemmän analyysin Bitcoinin osalta, joka on aikaväliltä 2013–2018. Vertailukohtana tutkielmassa on myös USD/EUR-aikasarja. Tutkielmassa pyritään lisäksi selvittämään hintakuplien taustalla vaikuttavia tapahtumia ja selitetään niiden vaikutusta hinnan muutoksiin. Teoriaosuudessa käsitellään kryptovaluuttoja sijoituskohteena, niiden taustalla toimivaa lohkoketjuteknologiaa ja hintakuplien tilastollista mallintamista sekä tutkielman kannalta keskeisiä rahoituksen teorioita.

Hintakuplien olemassaoloa testataan aikasarjoissa rullaavan ja itseään toistavan oikeahäntäisen yksikköjuuritestin avulla eli GSADF-testin avulla. GSADF-testissä nollahypoteesina on yksikköjuuri ja vastahypoteesina on niin kutsuttu *'mildly explosive process'*, joka viittaa hintakuplaan aikasarjassa. Aikasarja on tällöin epästationaarinen ja siihen vaikuttavat shokit vahvistuvat ajan myötä. GSADF-testi havaitsee tehokkaasti useita peräkkäisiä hintakuplia aikasarjassa ja soveltuu siten kryptovaluuttojen tarkasteluun erityisen hyvin. Hintakuplien alkamis- ja päättymisajankohdat aikamerkitään vertaamalla testin arvoja Monte Carlo -simulaatiolla saatuihin kriittisiin arvoihin kunakin ajanjaksona. GSADF-testin perusteella havaitaan hintakuplan merkkejä Bitcoinin, Ethereumin ja Litecoinin aikasarjoissa ja aikamerkintä osoittaa, että hintakuplia on ollut useita aikavälillä 2015–2018 sekä Bitcoinin pidemmässä aikasarjassa aikavälillä 2013–2018. USD/EUR-kurssin aikasarjassa ei havaita ainutakaan hintakuplaa aikavälillä 2015–2018. Kryptovaluuttojen kohdalla hintakuplia esiintyy erityisesti 2017, jolloin on nähty suurin hintojen nousu kaikissa kryptovaluutoissa. Samanaikaisesti USD/EUR-kurssissa voidaan havaita arvon laskua.

Hintakuplien taustalla havaitaan tapahtumia, joiden voidaan analysoida vaikuttaneen hintojen radikaaleihin muutoksiin, kuten lohkoketjuteknologian kehittyminen sekä kryptovaluuttojen omaksuminen yritysten maksuvälineenä. Hintakuplien romahduksia on edeltänyt esimerkiksi säännöstelyn lisääntyminen kryptovaluuttamarkkinoilla tai teknologinen haaste, jota kryptovaluutat ovat kohdanneet. Kryptovaluuttojen arvonmääritykseen tarvitaankin uusia menetelmiä, jotta sijoituskohteen fundamentaalinen arvo voidaan määrittää ja todeta hintakuplien olemassaolo luotettavammin.

Asiasanat	Lohkoketjuteknologia, kryptovaluutta, hintakupla
Muita tietoja	





**TURUN
YLIOPISTO**
Kauppakorkeakoulu

HINTAKUPLAT KRYPTOVALUUTOISSA

**Bitcoinin, Litecoinin, Ethereumin ja USD/EUR-kurssin
hintakuplien havaitseminen GSADF-menetelmällä**

Laskentatoimen ja rahoituksen
pro gradu -tutkielma

Laatija:
Helka Kärkkäinen

Ohjaajat:
Prof. Mika Vaihekoski
KTM Valtteri Peltonen

12.12.2018
Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	11
1.1	Taustaa	11
1.2	Tutkielman tavoite.....	14
1.3	Tutkielman rakenne.....	15
2	LOHKOKETJUTEKNOLOGIA JA KRYPTOVALUUTAT	16
2.1	Lohkoketjuteknologia.....	16
2.1.1	Taustaa	16
2.1.2	Lohkoketjuteknologian pääelementit.....	17
2.1.3	Yksimielisyys lohkoketjussa.....	19
2.2	Kryptovaluutta.....	23
2.2.1	Määritelmä	23
2.2.2	Rooli sijoituskohteena.....	24
2.2.3	Hyödyt.....	25
2.2.4	Erilaisia kryptovaluuttoja.....	26
2.3	Kryptovaluuttojen haasteet.....	28
2.3.1	Turvallisuus.....	28
2.3.2	Säätely.....	30
2.3.3	Tekniset haasteet.....	31
3	HINTAKUPLAT RAHOITUSTEORIASSA.....	33
3.1	Hinnan määrittäminen	33
3.2	Hintakupla	35
3.2.1	Taustaa	35
3.2.2	Historialliset hintakuplat.....	37
3.3	Rationaalinen hintakupla.....	39
3.4	Epärationaalinen hintakupla.....	40
3.5	Rahan hintakuplat.....	41
4	HINTAKUPLIEN TILASTOLLINEN MALLINTAMINEN.....	43
4.1	Hintakuplien mallintaminen.....	43
4.1.1	Taustaa	43
4.1.2	Tutkimusmenetelmät.....	46
4.1.3	Kryptovaluuttojen arvonmäärittäminen	48
4.1.4	Hintakuplat kryptovaluutoissa	50
4.2	Yksikköjuuritestit hintakuplien havaitsemisessa	52
4.2.1	Epästationaariset prosessit	52

4.2.2	Dickey-Fullerin ja laajennettu Dickey-Fullerin -testi.....	54
4.2.3	Oikeahäntäinen yksikköjuuritestit	55
4.2.4	Asymptoottinen ja äärellinen jakauma	57
4.2.5	Rullaavat ja itseään toistavat yksikköjuuritestit.....	59
4.2.6	Aikamerkintä	62
5	EMPIIRINEN TUTKIMUS	65
5.1	Tavoitteet.....	65
5.2	Data ja menetelmä.....	66
5.3	Datan kuvailu	67
5.3.1	Kryptovaluutat ja USD/EUR-kurssi	67
5.3.2	Kuvailevat tunnusluvut	70
5.3.3	Stationaarisuus	76
5.4	Bitcoin 2015–2018	78
5.4.1	Kriittiset arvot ja testitulokset.....	78
5.4.2	Aikamerkinnät	79
5.5	Bitcoin 2013–2018	85
5.5.1	Datan kuvailu	85
5.5.2	Kriittiset arvot ja testitulos.....	88
5.5.3	Aikamerkinnät	89
5.6	Ethereum	94
5.6.1	Kriittiset arvot ja testitulos.....	94
5.6.2	Aikamerkinnät	94
5.7	Litecoin	98
5.7.1	Kriittiset arvot ja testitulos.....	98
5.7.2	Aikamerkinnät	99
5.8	Dollarin eurokurssi.....	104
5.8.1	Kriittiset arvot ja testitulos.....	104
5.9	Tulosten robustisuus.....	106
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	108
7	YHTEENVETO.....	111
	LÄHTEET.....	113

KUVIOT

Kuvio 1 Lohkoketjuteknologian pääelementit (Hileman & Rauchs 2017, 14).....	18
Kuvio 2 Lohkoketjuteknologia ja ' <i>Proof of Work</i> '-varmennus	20
Kuvio 3 Dot.com hintakupla (Homm ja Breitung 2012)	38
Kuvio 4 Asymptootiset jakaumat ADF-testit (Phillips ym. 2015)	59
Kuvio 5 GSADF kriittiset arvot	59
Kuvio 6 Rullaava ADF-testi (Caspi 2013, 5).....	60
Kuvio 7 Sup ADF -testi (Phillips ym. 2015)	60
Kuvio 8 Generalized sup ADF -testi (Phillips ym. 2015).....	62
Kuvio 9 Backward sup ADF -testi (Phillips ym. 2015).....	63
Kuvio 10 Backward GSADF (Phillips ym 2015)	64
Kuvio 11 Kryptovaluuttojen hinnat 2015–2018	68
Kuvio 12 Kryptovaluuttojen logaritmiset hinnat	69
Kuvio 13 USD/EUR kurssi	70
Kuvio 14 Bitcoin tuottosarjan jakauma	72
Kuvio 15 Litecoin tuottosarjan jakauma.....	72
Kuvio 16 Ethereum tuottosarjan jakauma.....	73
Kuvio 17 USD/EUR-kurssi tuottosarjan jakauma	73
Kuvio 18 PACF hintasarjasta ja ACF tuottosarjasta (Bitcoin)	74
Kuvio 19 PACF hintasarjasta ja ACF tuottosarjasta (Ethereum)	74
Kuvio 20 PACF hintasarjalle ja ACF tuottosarjalle (USD/EUR).....	75
Kuvio 21 PACF hintasarjalle ja ACF tuottosarjalle (Litecoin).....	75

Kuvio 22 Bitcoin aikamerkintä BSADF 2015–2018	80
Kuvio 23 Bitcoin aikamerkintä BSADF 2015–2018 (>6 päivää).....	81
Kuvio 24 Bitcoin 2015–2018 aikamerkintä SADF	85
Kuvio 25 Bitcoin hinta 2013–2018	86
Kuvio 26 Log-hinta Bitcoin	87
Kuvio 27 Tuottojen jakauma Bitcoin 2013–2018	88
Kuvio 28 BSADF-hintakuplat Bitcoin 2013–2018	89
Kuvio 29 Bitcoin BSADF-aikamerkintä 2013–2018	90
Kuvio 30 Aikamerkintä SADF Bitcoin 2013–2018	93
Kuvio 31 Aikamerkintä Ethereum BSADF	95
Kuvio 32 Ethereum hintakuplat BSADF (>6 päivää)	95
Kuvio 33 Aikamerkintä SADF Ethereum	98
Kuvio 34 Litecoin aikamerkintä GSADF	100
Kuvio 35 Hintakuplat BSADF Litecoin (>6 päivää)	101
Kuvio 36 Litecoin SADF-aikamerkintä	103
Kuvio 37 GSADF USD/EUR	105
Kuvio 38 Hintakuplat USD/EUR (>6 päivää)	105

TAULUKOT

Taulukko 1 Kryptovaluuttojen ja USD/EUR-kurssin kuvailevat tunnusluvut.....	71
Taulukko 2 Korrelaatio kryptovaluutat ja USD/EUR.....	76
Taulukko 3 ADF-testi Bitcoin.....	77
Taulukko 4 ADF-testi Ethereum.....	77
Taulukko 5 ADF-testi Litecoin	77

Taulukko 6 ADF-testi USD/EUR.	78
Taulukko 7 Testitulokset ja kriittiset arvot Bitcoin.....	79
Taulukko 8 Hintakuplat Bitcoin 2015–2018.....	81
Taulukko 9 SADF hintakuplat Bitcoin 2015–2018	84
Taulukko 10 Bitcoin 2013–2018 kuvailevat tunnusluvut	87
Taulukko 11 Kriittiset arvot ja merkitsevyystasot Bitcoin 2013–2018	89
Taulukko 12 Bitcoin 2013–2018 hintakuplat.....	91
Taulukko 13 SADF-hintakuplat Bitcoin 2013–2018	93
Taulukko 14 GSADF- ja SADF-tulokset ja kriittiset arvot Ethereum.....	94
Taulukko 15 Hintakuplat Ethereum	96
Taulukko 16 SADF-hintakuplat Ethereum	97
Taulukko 17 Kriittiset arvot ja testitulos Litecoin	99
Taulukko 18 Hintakuplien aikamerkintä Litecoin	101
Taulukko 19 GSADF- ja SADF-testitulos USD/EUR.....	104

1 JOHDANTO

1.1 Taustaa

Kindleberger ja Aliber (2005, 1) määrittävät hintakuplan kestäättömäksi hinnan tai rahavirran nousuksi, joka aiheuttaa sijoittajissa ensin hintoja nostavan ”manian” ja sitä seuraavan hintakuplan puhkeamisen ja hintojen romahduksen. Vuosi 2018 jäi monen sijoittajan mieleen kryptovaluuttojen hintojen valtavan nousun ja sitä seuraavan romahduksen takia. Huolimatta valtavasti uutisoinnin määrästä ja merkittävästä markkina-arvosta, ovat kryptovaluutat jääneet vaille luotettavaa teoreettista pohjaa.

Tutkielmassa tarkastellaan tilastollisin menetelmin kryptovaluuttojen hinnoissa ilmenviä hintakuplia itseään toistavan ja rullaavan oikeahäntäisen yksikköjuuritestin avulla eli GSADF-testin avulla, joka paljastaa aikasarjan ”räjähdysmäistä” käytöstä. Tutkielmassa on mukana Bitcoinin, Ethereumin ja Litecoinin historiallista päiväkohtaista aikasarjadataa sekä USD/EUR-kurssin aikasarjadataa vertailevana aineistona. Teoriassa käsitellään keskeisiä kuplateorioita, niiden matemaattista mallinnusta sekä tarkastellaan kryptovaluutan roolia sijoituskohteena. Teoriaosuus syventyy myös lohkoketjuteknologiaan, joka mahdollistaa kryptovaluutat ja on keksintönä merkittävä.

Kryptovaluutat ovat digitaalisia omaisuuseriä, jotka on luonut joko yksittäinen henkilö, yhteisö tai yritys. Ensimmäinen digitaalinen valuutta, Bitcoin, on luotu 2008 finanssikriisin jälkeen ja sen kehitti anonymina pysynyt ”Satoshi Nakamoto”. Nakamoton perimmäisenä tarkoituksena oli luoda alusta, jonka avulla ihmiset voivat käydä keskenään kauppaa virtuaalisesti ilman välikätenä toimivaa rahoitusinstituutiota. Virtuaalivaluutta on luotu teknologiseen ympäristöön, jossa tietokannat on hajautettu käyttäjien välille ja varmennukseen käytetään julkisen avaimen salaustekniikkaa siirrettäessä rahaa tilien välillä. (Nakamoto 2008, 1–2.)

Kryptovaluuttojen taustalla toimiva lohkoketjuteknologia on keksintönä merkittävä ja sitä voidaan virtuaalivaluuttojen lisäksi hyödyntää esimerkiksi älykkäissä sopimuksissa, terveydenhuollon tietojärjestelmissä ja äänestysjärjestelmissä. Teknologia mahdollistaa teknisesti turvatuksen tiedonhallinnan kahden eri osapuolen välillä. (Beck ym. 2017.)

Kryptovaluuttaa ei ole laskenut liikkeelle pankki, eikä sitä säännellä viranomaisten toimesta, joten sitä ei ole tunnustettu viralliseksi valuutaksi. Kryptovaluutan arvon katsotaan muodostuvan ainoastaan kysynnästä sekä tarjonnasta ja sen arvo on vaihdellut merkittävästi sen olemassaolon aikana. Tästä johtuen sijoittajalle kryptovaluutta on edelleen korkeariskinen sijoituskohte. (Suomenpankki.fi.) Finanssivalvonta on varoittanut tiedotteessaan kryptovaluuttoihin liittyvistä riskeistä ja muistuttaa, että kryptovaluuttoja käytetään tällä hetkellä enemmän spekulatiiviseen sijoittamiseen kuin maksuvälineenä. Tiedotteessa varoitetaan myös ICO:sta *’Initial coin offering’*, joka sisältää merkittävästi riskiä

ja jossa pääoman menettämisen riski on sijoittajalle korkea. ICO:ssa yritys hakee rahoitusta laskemalla liikkeelle uuden kryptovaluutan, jota voidaan sopimuksesta riippuen esimerkiksi käyttää yrityksen palveluihin myöhempänä ajankohtana. (Fiva 2017.)

Kryptovaluuttamarkkinat ovat kasvaneet viime vuosina merkittävästi ja tällä hetkellä on olemassa yli 2000 erilaista kryptovaluuttaa, joiden yhteen laskettu markkina-arvo on yli 200 miljardia dollaria. Virtuaalivaluutoista tunnetuin, Bitcoin, on markkina-arvoltaan yli 50% koko virtuaalivaluuttamarkkinoista. (coinmarketcap.com.)

Hintakuplat aiheuttavat hinnan poikkeamisen sijoituskohteen fundamentaalisesta arvosta, jonka seurauksena talouteen syntyy epätasapainotiloja ja, jotka ilmenevät erityisesti hintakuplan puhkeamista edeltävänä ja sitä seuraavana ajanjaksona. Hintojen nousu yli tasapainotilan aiheuttaa esimerkiksi vääristyneitä vakuuskohteiden arvoja ja voi johtaa ylivelkaantumisen kautta rahoitusjärjestelmän riskien kasvuun. Hintakuplaa seuraa kuplan puhkeaminen ja hintojen voimakas lasku ja pahimmillaan vuoden 2008 kaltainen finanssikriisi. (Taipalus 2013.)

Kryptovaluuttojen arvo on tällä hetkellä vain muutamia prosentteja euron likvidistä rahamäärästä ja globaalisti kryptovaluutat eivät myöskään nykyisellä markkina-arvollaan aiheuta merkittävää riskiä reaalityalouden kannalta. On kuitenkin mahdollista, että tulevaisuudessa kryptovaluutat kasvattavat markkinaosuuttaan ja siksi on tärkeää, että negatiiviset vaikutukset rahatalouteen voidaan ennakoida. Viranomaisia kiinnostaa myös arvioida rahatalouden ja kryptovaluuttojen välisiä yhteyksiä. Tärkeää on luoda sääntely, joka estää kryptovaluuttamarkkinoiden epävakauden leviämisen globaaliin rahatalouteen. (ECB 2018.)

Monet asiantuntijat ovat kertoneet kantansa kryptovaluutoista ja kanta on melko yksimielinen. Tirole (2017) pitää Bitcoinia kuplana ja perustelee väittämänsä sillä, että se on omaisuuserä ilman minkäänlaista itseisarvoa, jonka arvo nojaa täysin ihmisten luottamukseen. Hän kuitenkin toteaa, että on olemassa joitain menestyneitä pitkäkestoisia kuplia, kuten kulta, jonka arvo ylittää selvästi sen mitä se olisi pelkästään raakamateriaalina arvioitaessa. Hän nostaa esiin myös veronkierron ja rahanpesun ongelmat kryptovaluutan kohdalla. Tirole kuitenkin myöntää taustalla toimivan teknologian nerouden.

Hintakuplia on tutkittu melko pitkään ja kuplien ennakkointia pidetään tärkeänä asiana, jotta niistä aiheutuvat kustannukset voitaisiin estää. Rahoitusmarkkinoilla keskuspankit ovat kiinnostuneita aikasarjadataan hyödyntämisestä hinnoitteluvirheiden havaitsemisessa. Sijoittajat taas ovat kiinnostuneita hintakuplien seuraamisesta sijoituspäätösten ajoituksen vuoksi. Sääntelyelimet ja poliittiset päättäjät ovat kiinnostuneita löytämään aikaisen varoitusjärjestelmän, jonka avulla hintakuplat voidaan havaita ja niihin voidaan reagoida ajoissa. Oikeahäntäiset yksikköjuuritestit havaitsevat räjähdysmäisiä prosesseja aikasarjadatasta ja voivat toimia markkinoiden diagnosoinnin välineenä. (Phillips, Shi, Yu 2014)

Vaikka kryptovaluutoissa ilmenevistä kuplista puhutaan jatkuvasti, on tutkimuksia aiheesta rajallisesti. Kryptovaluuttoihin liittyvien hintakuplien tutkiminen eroaa myös hie-
man osakkeiden ja esimerkiksi asuntomarkkinoiden hintakuplista, koska kryptovaluu-
toille ei voi laskea fundamentaalista arvoa diskonttaamalla tulevia kassavirtoja (osingot,
vuokrat). Kryptovaluuttojen kysyntä perustuu ainoastaan odotettuihin tuottoihin sijoitus-
kohteesta, kun se myydään myöhempanä ajankohtana, sillä valuutan omistuksesta ei saa
korkotuottoa tai muuta tulovirtaa. Markkinoita dominoi tämän vuoksi lyhytaikaiset sijoit-
tajat, jotka spekuloiivat trendejä hinnoissa. (Kristoufek 2013, 1.)

Taipalus (2012) on puolestaan tutkinut erityisesti osakkeissa ja kiinteistössä esiinty-
vien hintakuplien aikaisia signaaleja modifioitujen oikeahäntäisten yksikköjuuritestien
avulla. Phillips, Shi ja Yu (2015) tutkivat rullaavan ja itseään toistavan oikeahäntäisen
yksikköjuuritestin avulla hintakuplia S&P500-indeksissä ja havaitsivat useita kuplia ai-
kasarjassa. He vertailivat myös eri aikamerkintä metodeja tutkimuksessaan, joiden avulla
on mahdollista määrittää hintakuplan alkamis- ja päättymisajankohdat.

Cheung, Roca ja Su (2015) tutkivat kryptovaluutoissa ilmeneviä kuplia aikasarja-ana-
lyysilla ja havaitsivat Bitcoin/USD kurssissa hintakuplan merkkejä oikeahäntäisen yk-
sikköjuuritestin avulla. Wheatley ym. (2018, 3–4) käyttivät Bitcoinin fundamentaalisen
arvon määrittämisen perustana Metcalfen lakia, jonka mukaan arvo on suoraan verran-
nollinen verkon käyttäjien lukumäärän neliöön. Hintakuplien havaitsemiseen käytettiin
LPPLS '*Log-Periodic Power Law Singularity*'-mallia, joka havaitsee kestävämmän,
eksponentiaalisen hinnan nousun. Corbet ym. (2018) tutkivat GSADF-menetelmällä hin-
takuplia Bitcoinin ja Ethereumin aikasarjadatasta ja käyttivät hintakuplien merkitsemi-
seen BSADF-menetelmää. Tutkimukseen ei kuitenkaan sisälly vuoden 2017 loppupuolta
tai vuotta 2018, jotka ovat hintojen muutosten kannalta erityisen mielenkiintoisia. Ver-
tailevaa tutkimusta, jossa otetaan kryptovaluuttojen rinnalle tarkasteluun aito valuutta, ei
ole tehty.

Bettendorf ja Chen (2013) käyttivät myös Phillips-Shi-Yu -menetelmää havaitakseen
kuplia dollarin puntakurssin aikasarjadatasta. He tarkastelevat myös fundamentaalisia te-
kijöitä, jotka ovat vaikuttaneet hintakuplien taustalla ja huomaavat, että kurssissa oleva
hintakupla johtuu fundamentaalien räjähdysmäisestä käytöksestä. Dollarin eurokurssin
tarkastelua GSADF-menetelmällä ei löytynyt aiemmista tutkimuksista.

Kryptovaluutat ovat tutkimusaiheena melko uusi, mutta etenkin Bitcoinista löytyy jo
useita tutkimuksia. Tutkimukset ovat kuitenkin melko tuoreita ja niiden tarkastelu vaatii
lähdekriittisyyttä. Muun muassa Hayes (2017) käsitteli tutkimuksessaan kryptovaluutto-
jen arvon muodostusta empiirisesti ja sai tulokseksi Bitcoinin arvon muodostuvan pää-
osin sen sähkön kulutuksen kustannusten mukaan. Blau (2018) taas tarkasteli tutkimuk-
sessaan Bitcoinin hintadynamiikkaa ja spekulatiivista kaupankäyntiä. Kristoufek (2013,
3–5) tarkasteli Google ja Wikipedia -hakujen vaikutusta Bitcoinin hintaan aikasarjojen
avulla ja löysi yhteyden hakujen määrän ja Bitcoinin hinnan välillä. Myös päinvastainen

suhde löytyi hinnan nousun ja niitä seuraavien hakujen välillä. Ciaian ym. (2016) tutkivat Bitcoinin hinnan muodostusta ja otti huomioon hinnan muodostuksessa valuutan hinnan muodostukseen vaikuttavia tekijöitä, kysynnän ja tarjonnan vaikutuksen sekä kryptovaluutoille ominaisia arvoon vaikuttavia tekijöitä. He löysivät merkittävän suhteen Bitcoinin hinnan ja uuden informaation välillä, mutta vaikutus oli suurempi Bitcoinin alkuaikoina, kun se ei ollut yhtä tunnettu. Spekulatiiviseen sijoittamiseen viittaa tutkimustulos Wikipedia hakujen ja hinnan lyhyen ajan positiivisesta korrelaatiosta.

1.2 Tutkielman tavoite

Tutkielman tavoitteena on selvittää tilastollisin menetelmin, onko yleisimmissä kryptovaluutoissa havaittavissa hintakuplia GSADF-menetelmällä ja onko näitä kuplia mahdollista ennakoida. Tutkielmassa tarkastellaan kryptovaluuttoja myös ilmiönä ja pyritään kirjallisuuskatsauksen avulla selvittämään lukijalle kryptovaluuttojen taustalla toimivaa lohkoketjuteknologiaa sekä kryptovaluuttoihin liittyviä riskejä ja hyötyjä. Tutkielmassa käytetään termiä kryptovaluutta, sillä esimerkiksi virtuaalivaluutta ymmärretään joissain yhteyksissä, virtuaaliympäristöissä, kuten peleissä käytettäväksi rahayksiköiksi. Vertailun vuoksi tutkin myös dollarin eurokurssin aikasarjadatasta ilmeneviä hintakuplia.

Tutkimuskysymykset:

1. Onko kryptovaluuttakursseissa havaittavissa hintakuplia?
2. Onko hintakuplia mahdollista ennakoida tilastollisin menetelmin?

Lähteenä käytetään pääosin vertaisarvioituja tieteellisiä julkaisuja. Lähteinä on käytetty teoriassa myös osin kirjallisuutta ja ajankohtaisten tapahtumien osalta lehtiartikkeleita. Aiheen ajankohtaisuuden vuoksi lähteiden luotettavuuden arviointiin on käytetty erityisen paljon aikaa.

Empiirinen osuus toteutetaan tilastollisena analyysinä. Tutkielma rajataan koskemaan kolmea suuren markkinaosuuden omaavaa kryptovaluutta: Bitcoinia (n. 111 mrd. \$), Ethereumia (n. 22 mrd. \$) ja Litecoinia (n. 3 mrd. \$) (coinmarketcap.com). Näistä kolmesta kryptovaluutasta löytyy dataa tarpeeksi pitkältä aikaväliltä tutkielman toteuttamiseksi. dollarin eurokurssin hintakuplia tarkastellaan samalta ajanjaksolta 2015–2018 ja saadaan vertailukohtaa aitoon valuuttaan.

Tutkielmaan sisältyy myös oma osio Bitcoinin hintakuplista 2013–2018, jossa on sisällytetty aikasarja-analyysiin 2 vuotta lisää. Aiempaa aikasarjadataa ei ollut saatavissa luotettavista lähteistä, joten se jätetään tutkielman ulkopuolelle. Bitcoinin tunnettavuus ja vaihdanta oli todella vähäinen aina vuoteen 2012 asti, joten aikaisempi ajanjakso ei ole myöskään relevanttia tutkielman kannalta.

Tutkielmasta rajataan pois esimerkiksi Bitcoin Cash, sillä dataa ei ole saatavissa riittävän pitkältä aikaväliltä. Hintakuplien tarkastelussa keskitytään rationaalsiin kupliin, sillä niiden mallintaminen on rahoitusteorian näkökulmasta mielekkäämpää.

1.3 Tutkielman rakenne

Tutkielma koostuu kuudesta pääluvusta. Toisessa pääluvussa tarkastellaan teoriaa liittyen kryptovaluuttoihin sijoituskohteena ja lisäksi selkeytetään kryptovaluuttojen taustalla toimivaa lohkoketjuteknologiaa. Kappaleessa analysoidaan myös kryptovaluutan roolia sijoituskohteena, kryptovaluuttoihin liittyviä keskeisiä riskejä, sekä teknologian mahdollistamia hyötyjä. Toisessa kappaleessa esitellään myös tutkielmaan valitut kryptovaluutat ja niiden pääpiirteet.

Kolmannessa luvussa keskitytään rationaalisten ja epärationaalisten hintakuplien tarkasteluun rahoitusteorian näkökulmasta ja käsitellään keskeisimmät hintakuplien teorat. Kappaleessa käsitellään lyhyesti myös historiallisesti merkittäviä hintakuplia.

Neljännessä luvussa avataan hintakuplien matemaattista mallinnusta, kryptovaluuttojen arvonmäärittystä ja niiden hintakupliin liittyviä aiempia tutkimuksia sekä oikeahäntäisen yksikköjuuritestin teoriaa. Luvussa tarkastellaan myös GSADF-testin toimintamekanismia.

Viidennessä pääluvussa käsittelen empiirisen osuuden tulokset. Kuudennessa kappaleessa ovat johtopäätökset. Seitsemännessä luvussa on tutkielman yhteenveto.

2 LOHKOKETJUTEKNOLOGIA JA KRYPTOVALUUTAT

2.1 Lohkoketjuteknologia

2.1.1 Taustaa

Ensimmäinen sovellus lohkoketjuteknologiasta oli nimimerkin Satoshi Nakamoto kehittämä Bitcoin virtuaalivaluutta, joka julkaistiin vuonna 2009. Nakamoton loppuvuonna 2008 julkaisema artikkeli keskittyy lohkoketjuteknologian hyödyntämiseen nimenomaan kryptovaluutoissa. Näin sovellettuna lohkoketjuteknologia mahdollistaa ihmisten välisen rahansiirron luotettavasti internetin välityksellä ilman pankkia välittäjänä. Teknologia toimii hajautetusti eri käyttäjien välillä ja sitä ei kontrolloi mikään viranomainen. Tietokanta on eri käyttäjien nähtävissä ja näin todennettavissa, mutta tapahtumat ovat anonyymeja. Perinteisen pankkijärjestelmän heikkoutena Nakamoto näki transaktioiden hitauden globaalisti, sekä rahansiirtojen korkeat kulut. Rahan siirtoihin liittyy myös riskiä, sillä tapahtumat ovat purettavissa jälkikäteen ja tällöin ostajaosapuoli voi käyttää informaatioetua hyödykseen. Fyysinen raha poistaa kyseiset riskit, mutta lohkoketjuteknologia tarjoaa ensimmäisen turvatun kahden välisen viestintäkanavan rahansiirrolle. (Nakamoto 2008, 1.)

Lohkoketjuteknologiassa tietokanta on jaettu kaikille käyttäjille, jolloin transaktiot hyväksytään vain verkon jäsenten enemmistön hyväksynnän kautta. Lisäksi esimerkiksi Bitcoinin kohdalla transaktion suorittamiseen käytetään *'Proof of Work'*-protokollaa, jossa transaktiot varmennetaan tietokonetehoa vaativan ”työn” kautta, jonka seurauksena syntyy uusi lohko lohkoketjuun aina uuden transaktion tapahtuessa. Teknologia auttaa varmentamaan myös verkon jäsenten oikeellisuuden. (Trchorsch & Scheuermann 2016.) Verkon enemmistön laskemisessa otetaan huomioon CPU *'central processing unit'* eli tietokoneen prosessorin teho, jolloin enemmistöosuutta verkosta on vaikeampi saavuttaa verrattuna tilanteeseen, jossa äänivalta perustuisi esimerkiksi IP- eli *'Internet Protocol'*-osoitteeseen, joka määrittää internetiin yhteydessä olevan käyttäjän laitteen sijainnin ja erottaa näin käyttäjät toisistaan. (Nakamoto 2008, 3.)

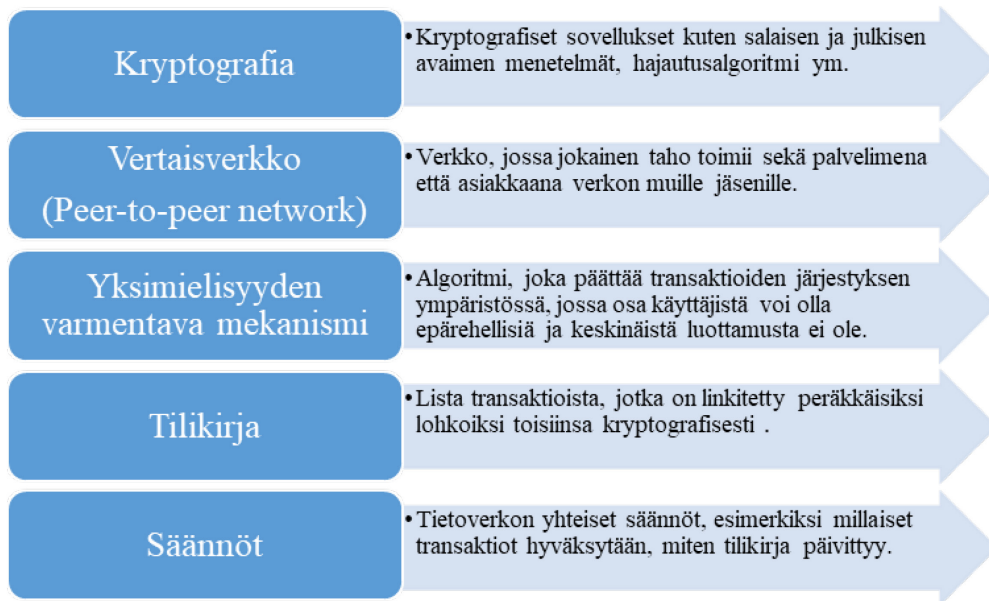
Glaserin (2017, 1550–1551) mukaan lohkoketjuteknologiaa on mahdollista hyödyntää monissa eri palveluissa, kunhan ne eivät ole turhan monimutkaisia. Esimerkkeinä joukkorahoitus, Airbnb- tai Uber-palvelut. Esimerkiksi Hyvärinen ym. (2017) esittivät tutkimuksessaan lohkoketjuteknologiaratkaisuja eri maiden välisen osinkojenmaksun verotuksen seurantaan. Lohkoketjuteknologialla voidaan seurata maksettuja veroja ja välttää kaksinkertaista verotusta ja veronkiertoa.

Yli-Huumo ym. (2016) ovat keränneet yhteen lohkoketjuteknologiaan liittyviä teknologian alan tutkimuksia ja havaitsivat, että 80% tutkimuksista keskittyy Bitcoinin teknologian tutkimiseen ja ainoastaan 20% keskittyy muihin lohko-ketjuteknologian sovelluksiin, kuten lisensointiin tai älykkäisiin sopimuksiin. Lohko-ketjun avulla sopimus voidaan jakaa usean osapuolen kesken ja muokata yksi kerrallaan niin, että päivitetty versio näkyy jokaiselle käyttäjälle verkostossa. Rahoitusala ei näe teknologiaa enää uhkana, vaan suuret pankit tutkivat mahdollisuuksia hyödyntää lohkoketjuteknologiaa omissa toiminnoissaan. Teknologiaa on mahdollista hyödyntää myös terveydenhuollossa, oikeusdokumenteissa, yksityisten osakeyhtiöiden osakkeiden merkinnässä, avioliittolupien arkistoinnissa ym. Sovelluksia on loputtomasti. (Crosby ym. 2016.)

J.P. Morgan (2018, 4) on kartoittanut raportissaan lohkoketjuteknologian mahdollisuuksia yritysrahoituksessa. Raportissa mainitaan pitkän aikavälin hyötyinä erityisesti kustannusten lasku, likviditeetin kasvu, turvallisuuden paraneminen, tehokkaammat ja nopeammat prosessit sekä läpinäkyvyyden parantuminen. Haasteina teknologian omaksumiselle on raportin mukaan sen vaatimat alkuinvestoinnit uuden infrastruktuurin omaksumiseen, teknologiset haasteet ja nykyiset lohkoketjuteknologian teknologiset rajoitteet sekä turvallisuus haasteet. Yritysrahoituksessa teknologiaa voitaisiin käyttää konkreettisesti tasolla esimerkiksi toimitusketjujen hallinnassa, rahoituksen tarjonnassa ja hankinnassa, maksujenselvitysten nopeuttamisessa osapuolten kesken. J.P. Morgan on myös hakenut patenttia lohkoketjupohjaiselle pankkien väliselle P2P-maksujärjestelmälle (US Patent & Trademark Office 2018).

2.1.2 Lohkoketjuteknologian pääelementit

Lohkoketjuteknologia mahdollistaa yksimielisyyden tietokannan muutoksissa, eri transaktioissa osapuolten välillä, ilman varmistusta osapuolten luotettavuudesta tai keskitettyä valvontaa. Taustalla on mekanismi, joka varmentaa, että jokaisen tietokannan osapuolen näkemys on yksimielinen muiden osapuolien kanssa. Lohkoketjuteknologian avulla pystytään vastaamaan myös kahdenkertaisen kulutuksen ongelmaan, joka oli aiempien digitaalisten valuuttojen heikkous. (Hileman & Rauchs 2017, 13.)



Kuvio 1 Lohkoketjuteknologian pääelementit (Hileman & Rauchs 2017, 14)

Kuviossa 1 on esitetty lohkoketjuteknologian pääelementit, jotka mahdollistavat teknologian hyödyntämisen kryptovaluutoissa sekä esimerkiksi älykkäissä sopimuksissa ja äänestysjärjestelmissä. Seuraavissa kappaleissa käsitellään pääelementit ja niiden taustalla toimiva teknologia pääpiirteissään.

Vertaisverkolla *'Peer to Peer Network'* (P2P) tarkoitetaan kahden tai useamman tietokoneen muodostamaa verkkoa, jossa osapuolet toimivat kaikki julkaisijoina ja samalla kuluttajina, eikä verkolla ole keskitettyä serveriä. (Antonopoulos 2015, 139.) Lohkoketjuteknologia toimii kirjanpidon tavoin, merkatien eri osapuolten suorituksia ”kirjanpitoon”, joka on kaikkien verkon jäsenten nähtävillä ja varmennettavissa. Jokainen transaktio tallentuu jokaisen käyttäjän nodeen, muodostaen tilikirjan transaktioista. (Yli-Huumo ym. 2016.) Nodella viitataan verkossa toimivaan fyysiseen koneeseen tai muuhun laitteeseen (Hanuliak 2002). Käyttäjän tunnistaa julkisesta avaimesta, mutta samaa nodea voi periaatteessa käyttää moni käyttäjä.

Lohkoketjuteknologia perustuu kryptografialle, joka tutkii, analysoi ja luo tapoja turvata viestintä tai muu transaktio (viestejä, tilisiirtoja ym.), jotta kolmannet osapuolet eivät pystyisi niitä tulkitsemaan. Kryptografiassa viesti on muokattu muotoon, jonka voi purkaa vain salauksen purkuun tarkoitetun avaimen avulla. Kryptografiaa käytetään myös henkilöllisyyden ja viestin oikeellisuuden todentamiseen viestinnässä eri osapuolten kesken, jotta kolmas osapuoli ei voi sekaantua viestintään. (Diffie & Hellman 1976, 29–30.) Kryptografiassa hyödynnetään *'one way function'*-funktioita, jolla tarkoitetaan funktiota, joka tuottaa samasta syötetystä luvusta aina saman tiivistefunktion ja eri syötöistä aina eri luvut, jolloin funktion ratkaiseminen taaksepäin on melkein mahdotonta. (Goldwasser 1997.) Esimerkiksi Bitcoinin kohdalla on käytössä SHA-256-tiivistefunktio, joka on algoritmi, jonka ratkaisemiseen vaaditaan niin paljon tietokonetehoa, että se on käytännössä

mahdoton. Tiivistefunktiolle löytyy vain yksi arvo taaksepäin laskettaessa, joten sen varmistaminen ratkaisun selvittyä on nopeaa. (Antonopoulos 2015, 191.)

Salaisen avaimen menetelmällä tarkoitetaan sitä, että viestin salaus ja salauksen purkaminen tapahtuvat samalla avaimella. Salatun viestin tulkintaan tarkoitettu avain täytyy olla molempien osapuolien hallussa, jolloin he ovat ainoat, jotka pystyvät viestiä tulkitsemaan. Salaisen avaimen avulla voidaan ratkaista sekä salausfunktio että avausfunktio viestille, jolloin puhutaan symmetrisestä salauksesta. Ongelmana salaisen avaimen menetelmässä on saada kyseinen avain kaikille osapuolille, niin ettei kukaan ulkopuolinen saa sitä käsiinsä. Avain täytyy toimittaa turvallisen kanavan kautta esimerkiksi rekisteröidyllä postilla tai lähetin kautta. Salaisen avaimen menetelmä on nopea ja pystytään hallitsemaan suuria määriä tietoa, mutta avaimen toimitus osapuolelta toiselle voi aiheuttaa aikaviivettä ja kustannuksia. (Diffie & Hellman 1976, 29–30.)

Julkisen avaimen salaustekniikassa salakirjoitus ja koodin purkaminen tehdään erillisillä avaimilla, salainen avain ja julkinen avain, jotka ovat molempien osapuolien hallussa. Tällöin puhutaan epäsymmetrisestä salauksesta. Julkisen avaimen salaustekniikka poistaa tarpeen avaimen toimitukselle fyysisesti ja turvatulla tavalla. (Diffie ja Hellman 1976, 29.) Lohkoketjuteknologia hyödyntää nimenomaan julkisen avaimen salaustekniikkaa, jossa julkinen avain jaetaan muille verkon jäsenille ja salainen avain pidetään käyttäjän omassa tiedossa. (Olleros & Zhegu 2016, 226.)

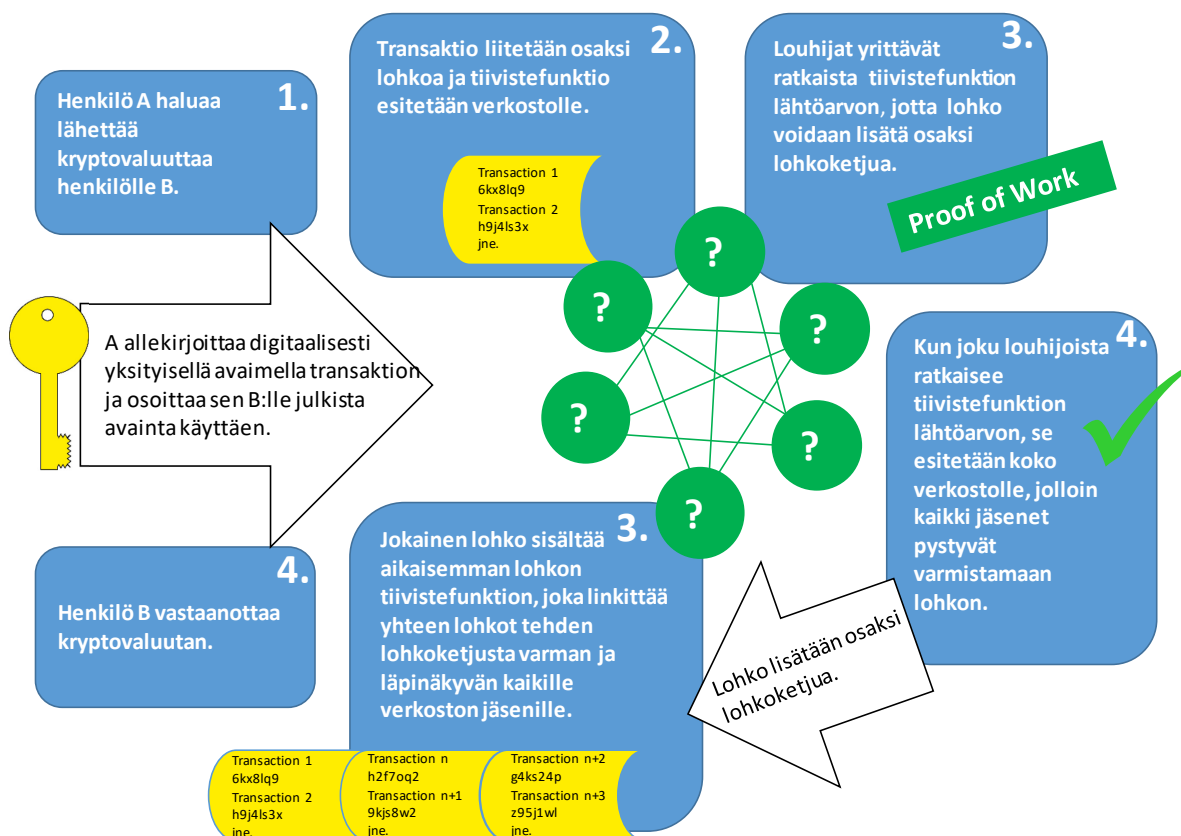
Jokainen transaktio vaatii digitaalisen allekirjoituksen, jotta uusi lohko voidaan lisätä ketjuun. Tämä allekirjoitus saadaan aikaan oikealla julkisen ja yksityisen avaimen parilla, joka on käyttäjän hallussa. (Antonopoulos 2015, 61.) Julkista avainta käytetään käyttäjän osoitteessa, joka voi olla esimerkiksi kryptovaluuttalompakon osoite. Yksityistä avainta käytetään käyttäjän tunnistamiseen ja esimerkiksi kryptovaluutoissa, valuutan kuluttamiseen ja transaktioiden allekirjoittamiseen. Yksityinen avain on yleensä täysin satunnainen numerosarja, esimerkiksi Bitcoinissa 256-bittinen sarja. Julkinen avain on johdettu yksityisestä avaimesta käyttäen elliptisen käyrän salausmenetelmää, joka on yksisuuntainen funktio, joka perustuu logaritmiseen ongelmaan. Julkisesta avaimesta luodaan tämän jälkeen osoite yksisuuntaisen tiivistefunktion avulla. Tätä osoitetta voidaan käyttää lähettäessä kryptovaluuttaa osapuolelta toiselle. (Crosby ym. 2016 ja Antonopoulos 2015, 62–70.)

2.1.3 Yksimielisyys lohkoketjussa

Lohkoketjuteknologian tavoitteena on saada aikaan yksimielisyys hajautetussa tietokannassa ilman keskitettyä valvontaa ja osapuolien kesken, jotka eivät luota toisiinsa. (Reyna ym. 2018.) Hajautettu tietokanta sisältää tiedon kaikista transaktioista, jolloin kaikista

käyttäjistä tulee järjestelmän oikeellisuuden tarkkailijoita. Siirtoja varmennetaan, kun tarpeeksi moni jäsen tietokannassa on sitä mieltä, että siirto on oikein ja muutoksia ohjelmointiin voi tehdä vain yli 50 prosentin kannatuksella käyttäjistä. Jokainen tapahtuma tietokannassa sisällytetään lohkoon, joka sisältää tiedon esimerkiksi kryptovaluutan siirrosta ja transaktiossa siirretyn määrän. Jokaisella loholla on oma tiivistefunktio, esimerkiksi Bitcoinin kohdalla 256-bittinen riippuen lohkon sisällöstä. Lohkon sisällön muuttaminen muuttaa myös tiivistefunktiota ja näin tietomurto ilman, että käyttäjät huomaavat on mahdoton. Jokainen lohko sisältää edellisen lohkon tiivisteen ja muodostaa näin lohkokohistorian, jonka kautta voidaan mennä aina ensimmäiseen louhittuun kolikkoon asti. Tätä verkostoa ylläpitää ja seuraa jokainen tietokone, joka on verkostossa kiinni. (Harwick 2016.)

Kuviossa 2 on esitetty kryptovaluutan lähettämisen vaiheet, kun henkilö A lähettää henkilölle B esimerkiksi Bitcoinia *'Proof of Work'*-varmennukseen perustuvassa lohkoketjussa. Kuvio kiteyttää myös 2.1.2 kappaleessa käytyjä asioita, kuten yksityisen ja julkisen avaimen toimintaperiaatteen.



Kuvio 2 Lohkoketjuteknologia ja *'Proof of Work'*-varmennus

Nakamoto (2009, 3) puhuu artikkelissaan *'Proof of Work'*-termistä, joka viittaa siihen, että lohkon lisääminen osaksi ketjua vaatii työtä eli tietokonetehoa. Saadakseen uuden lohkon lisättyä ketjuun hajautetusti eri tietokoneilla toimivat louhijat ratkaisevat tiivistefunktion bittisarjan osia saadakseen selville lohkoa vastaavan sarjan. Kun tarpeeksi monta ratkaisua tähän löytyy, voidaan lohko lisätä osaksi ketjua, ja ensimmäisenä kyseisen algoritmin ratkaisija eli louhija saa palkkioksi uutta louhittua kryptovaluuttaa tai palkkion, jonka siirron tekijä on voinut antaa nopeuttaakseen transaktion tapahtumista. Lohkot kiinnittyvät aina edellisiin lohkoihin muodostaen jatkuvan ketjun, joka on jokaisen noden serverillä. Tiivistefunktion ratkaiseminen vaatii tietokonetehoa ja sähköä, joten on loogista, että louhinnasta saa myös palkkion. Louhinnan ansiosta transaktiot varmistuvat ja syntyy uutta kryptovaluuttaa markkinoille ennakoidusti ja kontrolloidusti. (Tschorsch & Scheuermann 2016 ja Crosby ym. 2016.)

Louhinnan vuoksi liikkeellä olevien kolikkojen määrä kasvaa jatkuvasti ja samalla tiivistefunktioiden vaikeusaste kasvaa, jotta tietokonetehon lisääntyessä kolikkojen tarjonnan nopeus olisi vakio (Harwick 2016). Monet kryptovaluuttaohjelmoinnit ovat asettaneet maksimitarjonnan lopulliselle valuuttojen määrälle, jolloin louhinta vaikeutuu ja uusien kryptovaluuttojen louhinta hidastuu ajan kuluessa. Joillakin kryptovaluutoilla liikkeellelasku on nopeampaa ja esimerkiksi NEM-kryptovaluutta on jakanut kaikki kryptovaluutat jo liikkeelle. Joillakin kolikoilla taas, kuten Ethereumilla kolikkojen määrä on ääretön. Usein äärettömän määrän louhivilla kryptovaluutoilla on vuosiraja louhinnalle. Ne kryptovaluutat, jotka ovat valinneet Bitcoinin tavoin kiinteän määrän tarjontaa, ovat oletetusti deflatorisia ominaisuuksiltaan, mikäli kysyntä kasvaa tulevaisuudessa. Tämä voi myös johtaa sijoittajien spekulatiiviseen käytökseen. (Ciaian 2017.)

Bitcoinien louhiminen on lisääntynyt ja samalla tiivistefunktion ratkaiseminen ja louhinnalla palkkioiden tienaaminen on tullut haastavaksi. Louhinta vaatii yhä enemmän tietokonetehoa ja sähköä, jotta palkkioihin on mahdollisuutta. Nykyisin louhijat muodostavat *'mining pool'*-termillä kutsuttuja yhteisöjä, jolloin käytössä on enemmän tietokonetehoa ja sähköä sekä suurempi todennäköisyys saada palkkio louhinnasta. Louhijat toimivat tällöin yksilöinä, mutta jakavat palkkiot. Tämän kaltaiset liittoumat saattavat vaarantaa lohkoketjuteknologian luotettavuuden, sillä jokin yhteisö voi, saadessaan yli 50 prosentin laskentatehon, manipuloida järjestelmää hyväksymällä esimerkiksi väärennetyjä transaktioita. (Böhme ym. 2015.) Pienemmästä, jaetusta palkkiosta huolimatta yhteisöön liittyminen takaa kuitenkin louhijalle varmemman tulon, kuin yksin louhiminen, sillä käytössä on moninkertainen määrä tietokonetehoa. (Antonopoulos 2015, 209.)

Lohkoketju voi myös haarautua, mikäli ratkaisuja kryptografiseen ongelmaan tulee monta samanaikaisesti, joka saa lohkoketjun jakautumaan kahteen suuntaan. Haarautumistilanteessa se ketju, johon kohdistuu enemmän tietokonekapasiteettia voittaa ja toinen osa (haarukkaa) mitätöityy. Tämä mahdollistaa niin sanotun 51%-hyökkäyksen (kappale

2.3.1) jonka avulla joku voi saada käytettyä kolikon kahdesti, mikäli valtaosa verkon jäsenistä toimii epärehellisesti. Kuuden peräkkäisen lohkon jälkeen ketjua pidetään yleensä suhteellisen varmana ja rahan siirron voidaan sanoa olevan lopullinen. (Tschorsch & Scheuermann 2016.) Järjestelmän päivittyminen on kryptovaluutan kehittäjien hallinnassa, mutta jokainen päivitys tulee hyväksyttävä verkoston eri käyttäjien välillä (Harwick 2016).

Ohjelmoitujen lohkoketjujen koodeja pyritään parantamaan ja optimoimaan jatkuvasti, jotta teknologia olisi mahdollisimman turvattua. Parannuksia kutsutaan *'soft fork'*- ja *'hard fork'*-termeillä. *'Soft forkissa'* lohkoketju päivitetään niin, että aikaisemmat lohkot ovat yhteydessä uuteen päivitettyyn lohkoketjuun. *'Soft forkissa'* valtaosan louhijoista on päivitettävä uuteen ohjelmointiin ja hyväksyttävä päivityksen käyttöönotto. *'Hard fork'* tarkoittaa niin radikaalia muutosta olemassa olevaan lohkoketjuun, että se ei ole enää yhteensopiva aikaisempien lohkojen tai transaktioiden kanssa. Verkoston kaikkien jäsenten täytyy päivittää uuteen ohjelmistoon ja ne, jotka eivät päivitä jäävät lohkoketjun ulkopuolelle. Lohkoketju voi näin haarautua kahteen täysin ketjuun verkostossa. Esimerkkinä Bitcoin lohkoketjusta *'hard forkin'* kautta syntynyt Bitcoin Cash. Haarautuneet lohkoketjut ovat kehittyneet osaltaan ja ovat nykyään kilpailevia kryptovaluuttoja. (Reyna ym. 2018.)

Varmennukseen käytettävän *'Proof of Work'*-protokollan kritiikkinä on esitetty viive ja suuri energian kulutus, jonka seurauksena on viime aikoina yritetty kehittää parempia yksimielisyyden takaavia mekanismeja. Suosituin vaihtoehto konsensusmekanismiksi tällä hetkellä on *'Proof of Stake'*-menetelmä, jota kutsutaan myös ”osakkuusvarmennukseksi”. Menetelmä perustuu siihen, että käyttäjät, joilla on enemmän kryptovaluuttoja hallussaan ovat kiinnostuneempia järjestelmän toimivuudesta ja selviytymisestä. Tämän vuoksi nämä käyttäjät soveltuvat järjestelmän oikeellisuuden valvojiksi parhaiten. Menetelmässä algoritmi päättää sattumanvaraisesti käyttäjän, joka on vastuussa lohkon luomisesta, perustuen hänen omistamien kolikkojen määrään. *'Proof of Stake'*-protokolla on kuitenkin saanut kritiikkiä siitä, että menetelmä ei kannusta nodeja äänestämään oikean lohkon puolesta. Menetelmä myös johtaa siihen, että ”riikkaat rikastuvat ja köyhät köyhtyvät”, sillä ne ketkä valmiiksi omistavat eniten kolikoita, saavat niitä lisää myös helpommin, joka tekee menetelmästä epäoikeudenmukaisen. (Reyna ym. 2018.)

2.2 Kryptovaluutta

2.2.1 Määritelmä

Digitaalisia valuuttoja on ollut käytössä jo 1990-luvulta lähtien, erityisesti peleissä ja erilaisissa virtuaalimaailmoissa (Second Life). David Chaum (1982) nähdään usein digitaalisen rahan alkuperäisenä kehittäjänä. Hän loi DigiCash -valuutan, joka ei kuitenkaan menestynyt markkinoiden riittämättömyyden vuoksi. Tämän lisäksi tärkeitä kehitysaskelaita kohti Bitcoinia oli Adam Backin luoma HashCash sekä Wei Dain B-money. (Rantala 2018.)

Ensimmäisissä digitaalisissa valuutoissa ongelmana oli kaksinkertaisen kulutuksen mahdollisuus *'double spending problem'*, jolla viitataan siihen, että sama käyttäjä voi kuluttaa saman virtuaalisen kolikon kahdesti lähettämällä sen kahdelle eri vastaanottajalle. Keskuspankin läsnäolo poistaa ongelman perinteisillä rahoitusmarkkinoilla, sillä rahayksiköillä on sarjanumerot ja pankki valvoo transaktioiden oikeellisuutta. (Nakamoto 2008, 2.) Kryptovaluutat toimivat lohkoketjuteknologian avulla ihmisten vaihdannan välineenä ilman pankkia välikätenä. Turvallisen omistuksen ja siirtojen teon varmistaa kryptografinen ongelma, jonka ratkaisu vaatii tietokoneen avulla laskentaa ja joka varmentaa, että tietyt tilisiirrot tehdään vain kerran. (Harwick 2016.)

Kryptovaluutat eivät ole fyysisiä kolikoita, vaan ne perustuvat erilaisiin transaktioihin, joissa vaihtuu omistusoikeus kahden osapuolen välillä. Jokaisella sijoittajalla on hallussaan julkinen avain ja yksityinen avain. Julkisen avaimen perusteella johdetaan maksun saajan osoite, johon siirto tapahtuu. Yksityinen avain on vain kryptovaluutan haltijan tiedossa se oikeuttaa kryptovaluutan käyttöön. (Tschorsch & Scheuermann 2016.)

Kryptovaluuttoja varten sijoittaja tarvitsee lompakon, jossa on käyttäjän julkinen ja yksityinen avain. Lompakkoja on erilaisia ja jokainen sijoittaja voi valita itselleen sopivimman riskiprofiilinsa mukaan. Paperilompakolla tarkoitetaan fyysistä paperille tulostettua tietoa käyttäjän yksityisistä avaimista, joka ei ole missään yhteydessä internetiin ja on näin turvallisin vaihtoehto kaikista. *'Hardware wallet'*-lompakko on internetiin yhteydessä olevasta tietokoneesta erillinen, offline-tilassa toimiva laite, jolloin tietoturva on huomattavasti parempi kuin internetyhteydessä olevassa ohjelmistossa. Kryptovaluuttoja varten on myös erilaisia online-lompakoita, joissa lompakoita hallitaan keskitetysti. Vaarana on kuitenkin tietomurto palveluntarjoajan tietokantaan ja näin ollen käyttäjien yksityisten avaimien joutuminen väärin käsiin. (Tschorsch & Scheuermann 2016.) Kryptovaluuttoja voi säilöä myös niille tarkoitettussa pörssissä, mutta se on turvattomin vaihtoehto kaikista ja pörssiä ei yleensä suositella muuhun, kuin lyhytaikaiseen rahan säilyttämiseen. Esimerkiksi Mt. Gox -pörssi kadotti noin 750 000 eri käyttäjien Bitcoinia vuonna 2014 ja sanoi syynä olleen ulkopuolinen hakkerointi järjestelmään (Stowe 2014).

2.2.2 Rooli sijoituskohteena

Kryptovaluuttoja ei olla verifioitu oikeiksi valuutoiksi tällä hetkellä, eikä niiden liikkeellelaskija ole mikään virallinen taho tai viranomainen (Suomenpankki.fi). Kryptovaluutat on määritelty Suomen verotuslain mukaan muuksi, erikseen määrittelemättömäksi käyttäjien väliseksi sopimukseksi, jonka luovutusvoitot ovat pääomaverotuksen alaisia ja tappiot verovähennyskeltottomia. Louhinnasta saadut tulot lasketaan ansiotuloiksi. Voitto tai tappio kuitenkin realisoituu vasta, kun kyseiset kryptovaluutat vaihdetaan viralliseksi valuutaksi. (Vero.fi 2013.)

Uudistettu verolaki koskien kryptovaluuttoja astui voimaan 2018 ja sillä täydennetään aikaisemman lain puutteellisuuksia. Uuteen lainsäädäntöön on lisätty luovutusvoittoverotuksen alaiseksi myös vaihtaminen toiseen kryptovaluuttaan tai muuhun hyödykkeeseen tai palveluun. Voitot määritellään Suomessa aina euromääräisesti. Myös kryptovaluuttojen louhimisesta *'Proof of Work'*-protokollan mukaisesti saatava kryptovaluutta määritellään tuloksi, joka on verotuksen alainen. Kuitenkin uuden lainsäädännön mukaan louhimiseen käytettävästä tietokoneesta voi tehdä verovähennyksen osittain tai kokonaan ja louhimisesta aiheutuva sähköön kuluminen voidaan myös vähentää verotuksessa, mikäli se voidaan erotella muusta sähköön kulutuksesta. (Vero.fi 2018.)

Uusia kryptovaluuttoja on mahdollista saada myös lukitsemalla valuutan määrän verkon käyttöön *'Proof of Stake'*-protokollan tukemiseksi. Tällöin voidaan aikaisemman omistuksen perusteella saada lisää kryptovaluuttaa verkostosta ja tulo nähdään suoraan aikaisempiin omistuksiin perustuvana tulona. Kryptovaluutan arvo verotetaan tällöin pääomatulona. Uusi lainsäädäntö ottaa kantaa myös muun muassa pääoman kasvattamiseen tarkoitettujen ICO:jen *'initial coin offering'*-verotukseen. (Vero.fi 2018.) ICO tarkoittaa pääoman keruuta kryptovaluuttojen liikkeellelaskun kautta. Sijoittaja saa vastineeksi prosenttiosuuden uutta kryptovaluuttaa tai mahdollisesti rojalteja uudesta projektista, joka pääomalla käynnistetään. Sijoitus voi olla virallista valuuttaa tai toista kryptovaluuttaa. (Chohan 2017, 1.)

Lainsäädännön tarkoituksena on estää veronkierto ja määritellä mihin omaisuusluokkaan kryptovaluutta kuuluu. Kryptovaluutta voidaan nähdä ei-rahallisena sijoituskohteena tai valuuttana verotuksen näkökulmasta. Mikäli kryptovaluutta nähdään sijoituskohteena, kiinnitetään huomio voittoihin ja tappioihin, joita sijoituskohteesta syntyy. Jos taas sitä pidetään valuuttana, keskitytään kurssimuutoksista johtuviin voittoihin ja tappioihin. (He ym. 2016, 30.)

Digitaalinen raha muistuttaa monilta osin käteistä rahaa, sillä rahan siirrot ovat välittömiä ja niiden avulla voidaan nykyisin maksaa jo useita tuotteita ja palveluita. Käteinen raha voidaan käyttää vain kerran sen fyysisen olemuksen vuoksi, kun taas digitaalisen valuutan ongelmana on ollut kaksinkertaisen kulutuksen mahdollisuus. Ensimmäiset di-

gitaaliset valuutat muistuttivat monilta osin nykyistä pankkijärjestelmää, jossa kaikki rahansiirrot hoidetaan keskittyneesti tietyn auktoriteetin valvonnassa. (Pirjan ym. 2015.) Kryptovaluuttojen kohdalla kryptografinen varmennus estää valuutan käytön kahteen kertaan (Harwick 2016).

Valuuttaan liitettäviä erityispiirteitä ovat likviditeetti, laaja käyttömahdollisuus maksun välineenä ja arvon vakaus. Kryptovaluuttojen kohdalla erityisesti suuri volatiliteetti on nähty ongelmallisena, eikä valuuttoja voida tämän vuoksi pitää arvoa säilyttävinä sijoituskohteina. Voimakas volatiliteetti aiheuttaa sen, että kryptovaluutoissa ei säilötä arvoa juurikaan, vaan ne ovat lähinnä lyhytaikaisessa omistuksessa. (Harwick 2016 ja He ym. 2016, 17.) Kryptovaluuttojen hintojen ja volatiliteetin ei olla nähty olevan yhteydessä talouden tai rahoituksen muuttujiin, joka tekee sen suojauksen ja arvon ennustamisen erityisen haastavaksi (He ym. 2016, 17).

Nykyään erityisesti Bitcoinien hyväksyminen maksuvälineenä on lisääntynyt, vaikkakin lähinnä verkkokauppojen puolella. Kryptovaluuttoja vastaanottavat vähittäiskauppiat ilmaisevat hinnat perinteisen valuutan kautta ja muuttavat hintaa kurssin muuttuessa. Eri puolille maailmaa on myös tullut kryptovaluutta-automaatteja, joista on mahdollista ostaa Bitcoinia välityspalkkiota vastaan. (Harwick 2016 ja He ym. 2016, 17.) Bitcoinia hyväksytään maksuvälineenä esimerkiksi EY:n ja PwC:n palveluista ja yhteensä Bitcoinia ottaa maksuvälineenä vastaan yli 100 keskikokoista ja suurta yhtiötä (Becker 2018).

2.2.3 Hyödyt

Lohkoketjuteknologia vähentää tilisiirron kustannuksia osapuolelta toiselle ja monet ovat yksimielisiä siitä, että se tulee mahdollisesti korvaamaan digitaalisen rahansiirron aikaisemmat menetelmät tulevaisuudessa. Kryptovaluuttojen omaksuminen ainoana maksuvälineenä ja keskuspankkien roolin heikentyminen ei kuitenkaan ole realistista lähitulevaisuudessa. Tästä huolimatta kryptovaluutoilla on mahdollisuus saada jalansijaa valtioissa, joiden rahoitusjärjestelmä on korruptoitunut ja valuutta on heikko. Nykyään köyhimmissäkin maissa suurimmalla osalla ihmisistä on matkapuhelin, vaikka heillä ei olisi edes pankkitiliä käytössä. Kryptovaluuttojen siirto onnistuu puhelimella ja voi näin tarjota kulluttoman vaihtoehdon rahansiirtoihin. (Luther 2016, 401–402.)

Esimerkiksi Keniassa M-PESA-niminen mobiilimaksujärjestelmä on nopeuttanut maan rahoitusjärjestelmän kehitystä ja maassa on mobiilipankkitilejä enemmän kuin määrällisesti aikuista väestöä. Mobiilipankeissa on edelleen käyttömaksuja, vaikka ne ovatkin alhaisempia kuin esimerkiksi Western Unionilla. Western Unionin kohdalla ongelmana oli myös se, että fyysisiä rahansiirtopaikkoja ei ole ollut tarpeeksi tiheästi. Keniassa yleisimpiä tapoja lähettää rahaa ennen mobiilimaksun käyttöön ottoa oli postin

välityksellä tai ystävien kautta. (Mbiti & Weil 2011, 2–12.) Kryptovaluutoissa rahan siirto on edullista ja valuuttalompakon voi ladata puhelimeen. Lohkoketjuteknologia voi edesauttaa rahoituspalveluiden saatavuutta tarjoamalla turvallisen ja kustannustehokkaan vaihtoehdon rahansiirrolle. (He ym. 2016, 35.)

Manish ja Marsh (2017) tutkivat pankkijärjestelmän inkluusiota Yhdysvalloissa ja toteavat tutkimuksessaan, että seitsemän prosenttia yhdysvaltalaisista on täysin ilman pankkipalveluita. Suurin erottava tekijä on tulotaso, sillä alle 15 000 dollaria vuodessa ansaitsevista, jopa 25 prosenttia on ilman pankkipalveluita. Suurimpia syitä pankkipalveluiden puutteelle oli pankkitilin ylläpidosta seuraavat maksut sekä yllättävät kulut. Lohkoketjuteknologia olisi mahdollinen ratkaisu tähän, sillä se voisi vähentää kustannuksia ja mahdollistaa mobiiliteknologian laajemman käytön pankkipalveluissa. Pankkien likviditeetti voisi mahdollisesti parantua tilisiirtojen reaaliaikaisuuden johdosta, mikä vähentäisi myös operatiivisia kustannuksia, sekä ylläpidon ja valvonnan kustannuksia. Edellytyksenä olisi kuitenkin, että pankkien kustannussäästöt heijastuisivat suoraan asiakkaiden hintoihin, joka ei ole itsestäänselvyys. Tutkimuksen tuloksena on, että lohkoketjuteknologia parantaisi pankin tarjoamien palveluiden nopeutta ja saatavuutta, mutta ei tarjoa ratkaisua niille, jotka eivät luota pankkijärjestelmään tai haluavat enemmän yksityisyyttä.

2.2.4 Erilaisia kryptovaluuttoja

Nakamoto (2008) toi ensimmäisen lohkoketjuteknologialla toimivan kryptovaluutan Bitcoinin sijoittajien saataville tammikuussa 2009. Bitcoin on ensimmäisenä kryptovaluuttana kaikkein tunnetuin ja markkina-arvoltaan suurin (Luther 2016). Pienin yksikkö Bitcoinia on 10^{-8} BTC, joka on nimeltään Satoshi (Tschorsch & Scheuermann 2016). Bitcoin voidaankin nähdä lähtökohtana kaikille kryptovaluutoille, jotka ovat tulleet sen jälkeen markkinoille. Usein Bitcoinin jälkeen tulleita kryptovaluuttoja kutsutaankin nimellä Altcoin '*Alternative coin*', sillä ne käyttävät samaa lohkoketjuteknologiaa, jonka Bitcoin alun perin esitteli. Monet tämän hetken kryptovaluutoista eivät eroa juurikaan Bitcoinista, mutta on olemassa muutamia kryptovaluuttoja, jotka ovat tuoneet todellisia innovaatioita lohkoketjuteknologian hyödyntämiseen. (Pirjan ym. 2015.) Altcoinien etuna voidaan nähdä se, että ne jälkikäteen tullessa ovat voineet parantaa tiettyjä ohjelmointiin liittyviä ongelmia, joita Bitcoinin liittyy. Esimerkiksi Litecoin, jonka kokonaismäärä on ohjelmoitu olemaan 84 miljoonaa kolikkoa, verrattuna Bitcoinin 21 miljoonaan. (Luther 2016.) Altcoineilla on myös pyritty löytämään '*Proof of Work*'-varmennukseen vaihtoehtoja, jotka eivät vaatisi yhtä suurta tietokonetehoa, vähentämään transaktioihin kuluvaa aikaa, varmistamaan lohkoketjun anonymiteettiä ja kasvattamaan lohkon kokoa lohkoketjussa. Uusien kryptovaluuttojen luomisen ja lanseerauksen kustannuksia voidaan

kattaa ICO:jen avulla, joissa sijoittaja saa uutta kryptovaluuttaa vastineeksi sijoituksensa. (Kuo Chuen ym. 2018.)

Ethereumin on kehittänyt Vitalik Buterin, joka julkaistiin vuonna 2015 ensimmäisen kerran. Ethereum käyttää samaa lohkoketjuteknologian perusajatusta ja *'Proof of Work'*-protokollaa kuin Bitcoin, mutta sen Turing-ohjelmointi mahdollistaa myös erilaisten ei-keskitettyjen applikaatioiden ohjelmoinnin alustaan. Ethereumin lohkon luonti on selvästi nopeampaa kuin Bitcoinissa ja kestää ainoastaan noin 14-15 sekuntia, mikä mahdollistaa nopeammat transaktiot. Etherumissa uutta valuuttaa luodaan joka vuosi vakioinen määrä eli 18 miljoonaa Etheriä. (Buterin 2013.)

Ethereumin kehittäjä piti Bitcoinin lähestymistapaa lohkoketjuteknologiaan jäykkänä, sillä siinä hyödynnettiin teknologiaa ainoastaan digitaalisena valuuttana. Ethereumin alustaa taas voidaan rahoituksen lisäksi hyödyntää monilla muilla aloilla ja se on näin huomattavasti monipuolisempi lähestymistapa teknologiaan. Esimerkkeinä älykkäät sopimukset, äänestysjärjestelmät ja joukkorahoitus. Alustan avulla on myös mahdollista luoda organisaatio, jonka hallinto ei ole keskitetty *'decentralized autonomous organization'* tai DAO, jonka omistavat kaikki verkon jäsenet. Ethereumin sisäisenä valuuttana toimii kryptovaluutta ether, jota käytetään palveluiden maksamiseen ja louhinnasta palkitsemiseen. Ethereumin alustaan on myös mahdollista luoda uusia kryptovaluuttoja ja suorittaa kryptovaluutan liikkeellelasku eli ICO. (Buterin 2013.)

DAO oli Ethereumissa vuonna 2016 julkaistu älykäs sopimusalusta, jolla oli mahdollista kerätä joukkorahoitusta. DAO joutui hyökkäyksen kohteeksi vain 20 päivää sen lanseerauksen jälkeen, jolloin sillä oli ehditty kerätä 150 miljoonan dollarin arvosta etheriä. Hyökkäyksen yhteydessä kerätyistä varallisuudesta hävisi 60 miljoonan dollarin edestä etheriä. (Li ym.) Ethereumin lohkoketjussa suoritettiin *'hard fork'*-tapahtuman seurauksena ja lopputuloksena oli jakautuminen kahteen osaan: Ethereum classic -valuuttan ja Ethereumiin (Reyna ym. 2018).

Litecoin julkistettiin vuonna 2011 ja se oli yksi ensimmäisiä markkinoille tulleita Altcoineja. Litecoin luotiin Bitcoin lohkoketjuteknologian päälle. (White 2015.) Litecoinin kehittäjä Charlie Lee vertasi Bitcoinia kultaan ja Litecoinia hopeaa. Hänen mukaansa Bitcoin oli aikamme ”digitaalinen kulta” ja Litecoin ”digitaalinen hopea”, jotka toimivat arvon säilyttäjinä. Litecoinin loi Charles Lee yhteistyössä Bitcoin yhteisön kanssa, sillä hän näki ongelmallisena transaktioiden hitauden ja sen, että louhinta suosi suuria louhintayhteisöjä tavallisten louhijoiden sijaan. Bitcoinin louhinnasta kehittyi nopeasti niin vaativaa, että siihen tarvittiin erityisiä louhintaan suunniteltuja laitteistoja, eikä perinteisellä pöytäkoneella louhiminen ollut kannattavaa. (Takashima 2014.)

Suurimpana erona Bitcoiniin on *'Proof of Work'*-algoritmi, jota kutsutaan Litecoinin lohkoketjussa Script-nimellä (Bitcoinin kohdalla SHA256). Script-algoritmi on SHA-256-algoritmia nopeampi ja yksinkertaisempi, jonka vuoksi uuden lohkon luonti on nopeampaa. Algoritmi vaatii enemmän muistia, mutta vähemmän prosessointitehoa, jolla

pyrittiin estämään louhiminen ASIC-laitteilla eli *'Application-Specific Integrated Circuit'*-laitteilla, jotka on suunniteltu ainoastaan louhintaan. Myöhemmin kuitenkin ASIC-laitteita on kehitetty myös Litecoinille sopiviksi. (Litecoin.info 2018.) Litecoinissa lohkon tuottaminen on nopeampaa (noin 2,5 minuuttia), jonka vuoksi myös transaktiot ovat nopeampia kuin esimerkiksi Bitcoinilla. Litecoinin louhijat saavat tällä hetkellä 25 Litecoinia jokaisesta louhitusta lohkoista ja palkkion määrä puolittuu noin neljän vuoden välein. Litecoinien lopullinen määrä on noin 84 miljoonaa kolikkoa, joka on neljä kertaa enemmän kuin Bitcoinilla. (Litecoin.org 2018.)

2.3 Kryptovaluuttojen haasteet

2.3.1 Turvallisuus

Kryptovaluuttojen hajautetun valvonnan turvallisuus perustuu siihen, että valtaosa verkoston jäsenistä on rehellisiä. Mikäli valtaosa louhijoista päättää muodostaa liittouman ja onnistuu saavuttamaan valtaosan louhintaan vaaditusta verkoston tehosta, tulee järjestelmästä tämän ryhmittymän hallitsema. (Eyal & Sirer 2018.) Teoriassa lohkoketjuteknologiaa kohtaan on mahdollistaa kohdistaa hyökkäys, mikäli tietty taho saa haltuunsa yli 50 prosenttia verkon tehosta. Lohkoketjun kasvaessa vanhempiin lohkoihin on yhä vaikeampaa murtautua, sillä jokainen lohko on linkitetty toisiinsa. Hyökkäyksellä on kuitenkin mahdollista saada aikaan lohkoketjun haarautuminen, mikäli käytössä on tarpeeksi suuri osa tietokonetehosta. Vaikka hyökkäystä kutsutaan 51%-hyökkäykseksi, ei sen toteuttamiseen vaadita välttämättä yli puolta tietokonetehosta, vaan pienempikin määrä, noin 30 prosenttia, voi teoriassa riittää. Hyökkääjä voi näin suorittaa omia transaktioitaan kahdesti, esimerkiksi käyttää saman kryptovaluutan kahteen kertaan. Hyökkääjä ei kuitenkaan saa tietoonsa yksityisiä avaimia, joten hyökkäys vaikuttaa ainoastaan lohkoketjun häiriintymisen kautta transaktioiden hyväksyntään ja uusien lohkojen syntymiseen. Hyökkääjä voi myös estää transaktiot tietyiltä osoitteilta. (Antonopoulos 2015, 213–214.)

Hyökkäys on mahdollista kohdistaa transaktioiden järjestykseen, joka ei suoranaisesti ole kryptografialla suojattu. Strategiassa hyökkääjä käyttää kryptovaluuttaa esimerkiksi tietyn hyödykkeen ostamiseen, odottaa hyödykkeen toimitusta ja tekee tämän jälkeen transaktion, jossa lähettää saman määrän kryptovaluuttaa itselleen. Tämän jälkeen hyökkääjän täytyy vakuuttaa verkosto, että jälkimmäinen transaktio tapahtui ennen ensimmäistä. Mikäli kyseessä on digitaalinen hyödyke, toimitus tapahtuu melko nopeasti ja mikäli maksu on hyväksytty ja lohkoketjuun on syntynyt tämän jälkeen esimerkiksi viisi lohkoa, pidetään maksua varmana. Toimituksen jälkeen hyökkääjä luo transaktion, jossa

lähettää itselleen saman määrän kryptovaluuttaa, joka hylätään, mikäli se lähetetään verkostolle. Tämän vuoksi, hyökkääjä luo haarauman lohkoketjuun ja luo uusia lohkoja ketjuun, joilla on myös eri tiivistefunktiot ja näin ketju on täysin erillinen alkuperäisestä. Lohkoketjuteknologia perustuu siihen, että eniten lohkoja sisältävä haarauma eli se, jossa on eniten *'proof of work'*:iä otetaan totuutena lopulta ja toinen haarauma hylätään. Jotta hyökkääjän jälkimmäinen uusi transaktio ja siitä lähtevä lohkoketju voittaisi, täytyy hänellä olla enemmän kuin 51 prosenttia koko verkoston tietokonetehosta. (Buterin 2013.)

Eyal ja Sirer (2018) osoittavat tutkimuksessaan, kuinka itsekäs louhintayhteisö pitää ratkaisemansa lohkot salaisina, jolloin lohkoketjun haarauttaminen on tarkoituksenmukaista. Rehelliset louhijat jatkavat julkisen lohkoketjun louhintaa, kun taas itsekäs louhintayhteisö keskittyy yksityiseen haaraan. Kun enemmän lohkoja lisätään piilotettuun lohkoketjuun, voi se ohittaa julkisen ketjun pituuden. Kun julkinen lohkoketju saavuttaa piilotettua ketjua, itsekäs louhintayhteisö paljastaa ketjunsä, jolloin rehelliset louhijat ovat käyttäneet turhaa tietokonetehoa ratkoessaan julkista ketjua. Eyalin ja Sirerin (2018) mukaan tämän strategian avulla itsekkäät louhijat hukkaavat vähemmän energiaa kuin rehelliset, mikä johtaa lopulta rationaalisten louhijoiden liittymiseen itsekkääseen louhintayhteisöön. Lopulta louhintayhteisö, joka on saanut haltuunsa valtaosan verkoston tietokonetehosta, voi hallita lohkoketjua hyväksymällä ainoastaan omat lohkonsa osaksi ketjua ja keräten louhintapalkkiot itselleen. Yhteisöllä olisi kannuste pysyä piilossa, sillä kryptovaluutan arvon tulisi säilyä palkkioiden vuoksi. Lohkoketjun transaktiot toimisivat tällöin entiseen tapaan, mutta kaikki palkkiot menisivät monopolin tavoin louhintayhteisölle. Heidän mukaansa louhintayhteisöt, joiden koko on yli 25 prosenttia koko verkon louhintatehosta ovat vaarana ei-keskitetyille järjestelmälle.

Tietoturvaa voi uhata myös teknologian kehittyminen ja erityisesti kvanttietokoneet, joiden teho on moninkertainen nykyisiin tietokoneisiin verrattuna. Tietokoneiden laskentatehon kasvu on uhka kaikelle teknologialle, joka hyödyntää kryptografiaa ja voi näin mahdollistaa hyökkäyksen myös lohkoketjuun. ASIC-laitteet, joita hyödynnetään louhinnassa ovat kuitenkin jo kehittyneet niin tehokkaiksi, että kvanttietokoneisiin liittyvät uhat ovat luultua pienemmät. Suurimpana uhkana voidaan nähdä kvanttietokoneiden mahdollisuus laskea käyttäjän yksityinen avain julkaistusta julkisesta avaimesta ennen kuin uusi lohko lisätään ketjuun. Tämä tarkoittaa suojaavan algoritmin *'elliptic curve digital signature algorithm'*, ratkaisemista esimerkiksi Bitcoinin kohdalla noin 10 minuutin sisällä. Mikäli yksityinen avain saadaan laskettua julkisesta avaimesta ennen lohkon kiinnittymistä ketjuun, voi hyökkääjä käyttää yksityistä avainta tehden uuden transaktion samasta osoitteesta itselleen. Mikäli hyökkääjä vahvistaa, että transaktio on ollut lohkoketjussa ensimmäisenä, voi hän tämän jälkeen varastaa kaikki kryptovaluutat alkuperäisestä osoitteesta. (Aggarwal 2017, 1–2, 8.)

2.3.2 Sääntely

Kryptovaluuttojen arvo on tällä hetkellä vain muutamia prosentteja esimerkiksi euron likvidistä rahamäärästä ja globaalisti kryptovaluutat eivät nykyisellä markkina-arvollaan aiheuta merkittävää riskiä reaalityalouden kannalta. On kuitenkin mahdollista, että tulevaisuudessa kryptovaluutat kasvattavat markkinaosuuttaan ja siksi on tärkeää, että negatiiviset vaikutukset rahatalouteen voidaan ennakoida. Vaikutukset voivat levitä koko talouteen jos kryptovaluuttamarkkinoihin sijoitetaan yhä enemmän ja hintakupla aiheuttaa sijoittajien varallisuuden romahtamisen. Riskinä voidaan nähdä myös kryptovaluuttojen hintoihin sidotut johdannaisinstrumentit, joita on lanseerattu kasvavissa määrin viime vuosina. Kilpailua on myös alkanut näkyä kryptovaluuttalompakkojen ja pörssien palveluntarjoajien välillä. Lisäksi sijoittajansuojaan tulisi kiinnittää huomiota, sillä arvojen radikaalien muutosten vaikutukset voivat olla merkittäviä yksittäisen sijoittajan varallisuuteen. Tärkeää on luoda sääntely, joka estää kryptovaluuttamarkkinoiden epävakauden leviämisen talouteen. (ECB 2018.)

Kryptovaluuttojen sääntelyyn on alettu kiinnittää enemmän huomiota niiden markkina-arvon kasvaessa. Erityisesti pienille startup-yrityksille sääntely voi olla esteenä alalle lähtemiseen, joten on tärkeää, ettei sääntelyllä estetä innovaatioita. (He ym. 2016, 22, 25.) Esimerkiksi ICO:t helpottava uusien lohkoketjuteknologiaa hyödyntävien yritysten pääoman saantia, mutta niihin liittyy tällä hetkellä paljon sääntelyyn liittyviä riskejä sijoittajalle (Chohan 2017, 3–5)

Viranomaiset ovat huolissaan erityisesti kryptovaluuttojen hyödyntämisestä rahanpesussa, terrorismin rahoituksessa, veronkierrossa ja petoksissa. Yksimielisyys on myös siitä, että olisi tärkeää luoda kryptovaluuttamarkkinoille parempi sijoittajansuoja. Kryptovaluuttojen markkinaosuus on edelleen niin pieni, että vaikutuksia rahatalouden yleiseen tasapainoon ei tällä hetkellä ole. IMF *'international monetary fund'* kuitenkin näkee vaikutukset mahdollisina, mikäli teknologiaa aletaan hyödyntää laajemmin. Tärkeää olisi myös kehittää kansainvälisiä säännöksiä, sillä kryptovaluutat toimivat yli maan rajojen. Harmonisointi eri kansallisten säännösten välillä auttaisi kryptovaluuttoihin liittyvien riskien hallinnassa, kuitenkin pysäyttämättä teknologian kehitystä. (He ym. 2016, 5, 28–29.)

Kryptovaluutan lohkoketju ja tapahtuvat transaktiot ovat kaikkien verkoston jäsenten nähtävillä, mutta osoitteen takana toimivan henkilön on mahdollista pysyä anonyymina. Kryptovaluuttoja on mahdollista käyttää rahanpesuun, esimerkiksi Suomessa perustetulla Localbitcoins.com-sivustolla on mahdollista löytää henkilöitä, jotka ovat valmiita ostamaan tai myymään Bitcoineja käteistä vastaan. (Localbitcoins.com 2018.) Tämä tekee kryptovaluutoista houkuttelevan rikollisille. Esimerkkinä on pimeässä verkossa *'darknet'* toiminut kauppapaikka Silk Road -verkkokauppa, jossa myytiin muun muassa huumeita, väärennettyjä henkilöllisyystodistuksia ja jopa palkkamurhia. Silk Road -kauppapaikan

sulkeminen oli viranomaisille erityisen haastavaa, sillä kauppa toimii Tor-verkossa, joka tarjoaa käyttäjille ja verkkosivun ylläpitäjille anonymiteetin piilottamalla esimerkiksi IP-osoitteet. Toisena haasteena oli valuuttana käytetty Bitcoin, joka mahdollisti maksutietojen piilottamisen. (Interpol 2015, 7–8.)

Suomeen on valmisteilla lakiehdotus, jonka arvioidaan astuvan voimaan vuoden 2019 aikana. Lakiehdotuksella pyritään saavuttamaan kansallinen sääntely virtuaalivaluuttoihin liittyvien palveluntarjoajien sääntelystä ja rekisteröinnistä finanssivalvontaan. Tarkoituksena on mahdollistaa viranomaisten puuttuminen ja ennaltaehkäisy virtuaalivaluuttoihin liittyvien rikosten tapauksessa. Finanssivalvonnan täytyy lakiehdotuksen mukaan rekisteröidä virtuaalivaluuttojen vaihtopaikat, lompakkopalvelujen tarjoajat ja virtuaalivaluutan liikkeellelaskijat. Tarkoituksena on turvata myös asiakasta, sillä lakiehdotus vaatii myös palveluntarjoajan luotettavuuden selvittämistä, asiakasvarojen säilyttämisen kartoittamista, sekä suojaamista. Valvonnan piiriin ei kuulu kuitenkaan esimerkiksi tietoturvasta johtuvat tai toiminnan muut operatiiviset riskit. Taustalla on Euroopan Unionin rahanpesudirektiivin uudistus, jonka seurauksena virtuaalivaluuttojen vaihtopalvelut ja lompakkopalveluita tarjoavat yhtiöt joutuvat sääntelyn piiriin. (Finanssivalvonta 2018.)

2.3.3 Tekniset haasteet

Lohkoketjuteknologian mahdollisuuksista huolimatta, on teknologia vielä osittain keskeneräinen ja vaatii tehostamista, jotta sitä voitaisiin hyödyntää laajemmin. Yhtenä ongelmana on lohkon koko, joka vaikuttaa louhintanopeuteen ja tätä kautta transaktioiden nopeuteen. Tämän hetkinen lohkon koko ei riitä esimerkiksi HFT eli *'high-frequency trading'*-kaupankäyntiin. Suurempi lohko taas vaatii suurempaa varastointitilaa ja hitaampaa etenemisnopeutta verkossa. Tämä vie kohti keskitettyä valvontaa ja yksityistä lohkoketjua, joka mahdollistaisi suuremman lohkon ylläpidon ja tehokkaammat transaktiot. Samalla kuitenkin joudutaan tekemään kompromissi tietoturvan kannalta, joka on keskitetyssä järjestelmässä heikompi. Julkista lohkoketjua on miltein mahdotonta muuttaa, sillä jokainen verkoston jäsen tarkkailee transaktioiden oikeellisuutta. (Zheng ym. 2018.)

Tällä hetkellä suosituimmat konsensusmekanismit lohkoketjussa ovat *'Proof of Work'*- ja *'Proof of Stake'*-protokolla. PoW-menetelmässä ongelmana on valtava energian kulutus, jota tietokonetehoa vaativa louhinta aiheuttaa. PoS-menetelmä säästää energiaa, mutta se perustuu verkoston jäsenen omistamaan kryptovaluutan määrään ja johtaa suurimman varallisuuden omaavan verkoston jäsenen yhä kasvavaan osuuteen kryptovaluutasta, joka voidaan nähdä epäoikeudenmukaisena. (Zheng ym. 2016.)

Bentov ym. (2014) ehdottavat uutta konsensusmenetelmää *'Proof of Activity'* eli PoA, joka on yhdistelmä aikaisempia PoW:ia ja PoS:ia. Heidän mukaansa toimivan järjestel-

män tulisi tarjota kannustejärjestelmä, jonka perusteella omaa etuaan ajavat verkon jäsenet pyrkivät toimimaan verkoston parhaaksi. PoA tarjoaa parannetun verkoston rakenteen ja vähentää energian kulutusta. Parannettujen ominaisuuksien johdosta verkoston nodet joutuvat tekemään enemmän työtä ja kommunikoimaan enemmän kuin aiemmissa menetelmissä. PoA:ssa louhinta tapahtuu PoW-menetelmän kaltaisesti, mutta louhitut lohkot eivät sisällä tietoa transaktioista, vaan ainoastaa otsikon ja tiedon palkinnon saajasta. Tämän tyhjän lohkon louhimisen jälkeen PoA siirtyy '*Proof of Stake*'-menetelmään. Järjestelmä arpoo kryptovaluuttojen omistajista, omistusosuuden suhteen painotetusti, jäsenet, jotka hyväksyvät lohkon lisäämisen osaksi lohkoketjua. Kaikkien valittujen verkon jäsenten tulee hyväksyä lohko osaksi ketjua.

3 HINTAKUPLAT RAHOITUSTEORIASSA

3.1 Hinnan määrittäminen

Perinteisesti sijoituskohteen arvo on rahoitusteoriassa määritelty sen tulevien kassavirtojen diskontatun arvon mukaan (Tirole, 1985). Arvonmäärittämisessä tulee ottaa huomioon monia seikkoja: tulevaisuuden kassavirrat (osingot, vuokrat, korot), sijoituskohteen jäänösarvo sen tulon tuottamiskyvyn jälkeen sekä diskonttokoron suuruus, jolla tulevat kassavirrat diskontataan nykyhetkeen (Stiglitz 1990). Arvonmäärittäksen kautta saatua tulosta voidaan pitää sijoituskohteen fundamentaalisen arvona. Williams (1938, 55–59) perustelee fundamentaalisen arvon ja osinkojen välistä yhteyttä sillä, että osake on osuus tietystä yrityksestä ja osingot heijastavat tuloa, jonka yritys tekee omistajilleen. Mikäli hintakupla määritellään erona fundamentaaliseen arvoon, osinkoa jakamaton yhtiö voidaan nähdä hintakuplalle altistavana. (Tirole, 1985.)

Tehokkaiden markkinoiden hypoteesin (EMH) mukaan sijoituskohteiden hinnat heijastavat kaikkea olemassa olevaa informaatiota kyseisellä ajanhetkellä. EMH:n mukaan markkinahinnat kuvaavat täydellisesti sijoituskohteiden fundamentaalisia arvoja. Taustalla on kitkaton markkinoiden toimivuus ilman transaktiokustannuksia, jossa tiedon tulisi olla vapaasti kaikkien rationaalisten sijoittajien käytettävissä. Ihannetilassa hintojen tulisi heijastaa siis kaikkea olemassa olevaa informaatiota sijoituskohteen diskontatuista tulevista kassavirroista. Kun markkinat täyttävät nämä vahvat ehdot *'strong efficiency'*, ei edes sisäpiiritiedon hyödyntäminen auta ylituottojen saavuttamisessa. (Fama 1970.) Fama (1970) kuvailee tämän lisäksi kaksi heikompa vahvuutta markkinoiden tehokkuudelle. Heikosti vahvoilla markkinoilla *'weak efficiency'*-markkinoilla hinnat kuvastavat sijoituskohteeseen liittyvää historiallista tietoa, kuten aikaisempaa kurssikehitystä tai vaihdannan määrää. Heikosti vahvoilla markkinoilla teknisen analyysin hyödyntäminen ei johda ylituottoihin. Keskivahvoilla markkinoilla *'semi-strong efficiency'*-markkinoilla hinnat heijastavat kaikkea julkisesti saatavilla olevaa tietoa (tilinpäätökset, listautumisanalit ym.) ja historiallista tietoa. Ylituottoja ei voida saavuttaa yrityksen fundamentaaleihin perustuvalla analyysillä, sillä kaikki tieto on jo markkinoiden saatavilla.

Sijoituskohteiden hintoja tehokkailla markkinoilla kuvaa parhaiten *'random walk'* eli satunnaiskulku, jolloin hinnan muutokset ovat satunnaisia ja yllättäviä, koska ne ilmaantuvat välittömästi uuden informaation tullessa markkinoiden tietoon. Tehokkaiden markkinoiden toimivuuden argumenttina on usein se, että jopa kokeneimmille sijoittajille ylituottojen saavuttaminen markkinoilta on todella haastavaa. Kuitenkin markkinoiden tehokkuutta vastaan ovat useat anomaliat, joita osakemarkkinoilta on löydetty ja, joilla on ainakin lyhyellä aikavälillä voinut tehdä ylituottoja. (Shiller 2000, 171–180.) Hintakuplia ei kuitenkaan tulisi syntyä lainkaan, mikäli markkinat olisivat vahvasti tehokkaat, joten

hintakuplien tutkiminen lähtee yleensä olettamuksesta, että vahvasti tehokkaat markkinat eivät pidä paikkaansa kaikkina ajanhetkinä. (Taipalus 2012.)

Harrison ja Kreps (1978) kuvailevat monen periodin mallia, jossa huomioidaan markkinoiden epätäydellisyys. Tällöin fundamentaalinen hinta ei muodostu ainoastaan osinkovirrasta, vaan hintaan vaikuttaa myös mahdollisuus myydä tämä osinkovirta tulevaisuudessa. Monen periodin malli altistaa spekulatiolle, sillä henkilö voi ostaa sijoituskohteen nyt myydäkseen sen korkeammalla hinnalla tulevaisuudessa. Spekulaatiivisten voittojen mahdollisuus heijastuu näin myös sijoituskohteen hintaan. Tirole (1982) määrittelee spekulatiivisen prosessiksi, jossa hintariskiä siirretään. Hintariski siirtyy prosessissa enemmän riskiä karttavilta sijoittajilta vähemmän riskiä karttaville sijoittajille.

Harrisonin ja Krepsin (1978) mukaan sijoittajan käytös on spekulatiivista, mikäli hän on valmis maksamaan sijoituskohteesta enemmän sen vuoksi, että sen pystyy myymään myöhemmin, eikä sitä tarvitse pitää ikuisesti. Heidän mukaansa markkinoilla olevien sijoittajien subjektiiviset näkemykset vaikuttavat osaltaan hintaan, eikä markkinoilla ole vain yhtä objektiivista arvoa sijoituskohteelle. He puhuvatkin spekulatiivisista osakemarkkinoista, joissa toimivilla sijoittajilla on heterogeeniset odotukset. Malli lähtee olettamuksesta, että sijoittajat yhdistävät omia subjektiivisia asenteitaan ja uskomuksiaan arvioidessaan tulevia osinkoja ja tätä kautta osakkeen tulevaa hintaa.

Rationaalisten odotusten tasapainolla '*rational expectations equilibrium*' (REE) tarkoitetaan sitä, että markkinoilla toimivat agentit voivat oppia muodostamaan rationaalisia odotuksia markkinahinnoista yhdistelemällä tämän hetken tietoa ja tulevaisuuden odotuksia huomioimalla sijoituskohteen tuottojen todennäköisyysjakauman. (Blume, Bray & Easley 1981.) Sijoittajat käyttävät markkinahintaa ja subjektiivista tietoa sijoitusten kannattavuuden arviointiin. Osa sijoittajista näkee enemmän vaivaa sijoituskohteiden tutkimiseen ja tiedon keräämiseen ja heidän näkemyksensä heijastuvat sijoituskohteiden hintoihin, jolloin vähemmän perehtyneet sijoittajat voivat hyödyntää markkinahintoja sijoituspäätöksiä tehdessään. (Green 1975, 3–10.) REE olettaa, että sijoittajilla on odotuksia tai malli siitä, miten tasapainohinta kuvastaa alkuperäistä tietoa (Radner 1979). REE:n taustalla on paljon oletuksia yksilöiden käyttäytymisestä ja talouden tuntemisesta, joten malli voidaan nähdä osittain epärealistisena. Empiiriset testit ovat myös usein ristiriidassa rationaalisten odotusten mallien kanssa. (Massaro 2012, 12.)

Toisen näkökulman mukaan voidaan ajatella ihmisten käytöksen olevan rajoitetusti rationaalista. Näissä malleissa sijoittajien käytös hintojen ennakoinnissa ja päätöksenteossa nähdään rajoitetun rationaalisenä. Sijoittajat mukauttavat käytöstään havainnoimalla aikaisempia tapahtumia. Tämä tarkoittaa, että sijoittajat toimivat osittain intuitiivisesti päätöksenteossaan. Mallinnus on kuitenkin tällöin haastavaa, sillä rationaalisista oletuksista on luovuttava osittain. On myös mahdollista, että rajoitettu rationaalisuus johtaa loppujen lopuksi rationaaliseen tasapainotilaan. (Honkapohja 1993.)

Keynes (1934, 156) vertasi tutkimuksessaan osakemarkkinoita fiktion perustuvaan kauneuskilpailuun, jossa täytyy valita kuusi kauneinta kasvoa sadasta vaihtoehdosta. Ne, jotka valitsevat kaikista suosituimmat kasvot voivat voittaa palkinnon. Keynesin mukaan voittaja on se, joka arvaa keskimääräisen mielipiteen, jonka seurauksena rationaalinen henkilö pyrkii tähän. Sama kaava toistuu osakemarkkinoilla. Osakemarkkinoilla sijoittajat eivät hänen mukaansa arvosta osakkeita sen mukaan mikä niiden todellinen fundamentaalinen arvo on, vaan sen perusteella, mitä he ajattelevat muiden ajattelevan osakkeiden hinnaksi.

3.2 Hintakupla

3.2.1 Taustaa

Kindleberger ja Aliber (2005) määrittävät hintakuplan kestäättömäksi hinnan tai rahavirran nousuksi, joka aiheuttaa ”manian” sijoittajissa ja sitä seuraavan romahduksen. Hintakuplan aikana myös ’overtrading’ eli vaihdannan suuri kasvu lisää hintojen nousua. Stiglitz (1990) määrittelee artikkelissaan hintakuplan vallitsevan sellaisessa sijoituskohteessa, jonka arvo on korkea tällä hetkellä ainoastaan siitä syystä, että sijoittajat uskovat hinnan olevan korkeampi huomenna, eivätkä sijoituskohteen fundamentaaliset tekijät selitä hintaa. Kyseistä hintakuplaa kutsutaan spekulatiiviseksi hintakuplaksi, sillä korkeita hintoja ylläpitää suurelta osin sijoittajien ostokäyttäytyminen eikä fundamentaaliseen arvoon liittyvän tiedon olemassaolo markkinoilla, jolloin hintojen kehitys on kestäättömällä pohjalla (Shiller 2000, 5).

Flood ja Garber (1980) määrittelevät hintakuplan tilanteeksi, jossa esimerkiksi osakkeen markkinahinta on positiivisesti riippuvainen oman hintansa odotetusta muutosnopeudesta. Markkinoilla toimivat agentit ovat rationaalisia eivätkä tee systemaattisia virheitä ennustuksissaan, joten positiivinen riippuvuus hinnan ja odotetun muutosnopeuden välillä tarkoittaa samanlaista suhdetta hinnan ja todellisen muutosnopeuden välillä. Mielivaltaisten ja itseään toteuttavien odotettujen hinnan muutosten seurauksena sijoituskohteen hintamuutokset voivat poikeata fundamentaalisista arvoista, aiheuttaen hintakuplan.

Allen & Gale (2000) kuvailevat tutkimuksessaan eri talouksiin kohdistuvien hintakuplien kolme eri vaihetta. Ensimmäisenä vaiheena voidaan nähdä rahoitusmarkkinoiden vapautuminen tai keskuspankin päätös myöntää lainaa löyhemmin perustein. Tämä lainanannon ja rahan saatavuuden helpottuminen johtaa hintojen nousuun esimerkiksi asunnoissa ja osakkeissa. Hintojen nousu jatkuu muutamia vuosia ja samalla hintakupla kasvaa. Toisessa vaiheessa kupla puhkeaa ja omaisuuserien hinnat romahtavat hyvin lyhyellä aikaperiodilla. Kuplan puhkeaminen voi kestää muutamista päivistä jopa kuukausiin.

Kolmannessa vaiheessa sijoittajat, jotka ovat lainanneet rahaa ostaakseen kuplassa olevia omaisuuseriä korkeaan hintaan joutuvat konkurssiin. Tämä konkurssiaalto voi pahimmillaan johtaa pankkikriisiin tai valuuttakriisiin, jonka jälkeen talouden palautuminen ennalleen voi viedä jopa vuosia. Myös Kindleberger ja Aliber (2005) näkevät hintakuplien vauhdittajana luotonannon lisääntymisen taloudessa.

Säännellyillä markkinoilla kuplat johtuvat usein lainsäädännön muutoksista, esimerkiksi vapautumisesta, yli suuresta vaihdannasta tai yliarvioiduista kasvuennusteista. Esimerkiksi Bitcoinin markkinoilla näyttää pätevän samat lainalaisuudet: Sillä ei ole itsessään arvoa vaan sen arvo perustuu sijoittajien odotuksiin ja se toimii reguloimattomilla markkinoilla. (Cheung ym. 2015.) Tirolen (1985) mukaan kuplan syntyyn vaaditaan kolme tekijää: sijoituskohteen kestävyys, niukkuus ja yleiset uskomukset hinnan kehityksestä. Hänen mukaansa kuplat syntyvät usein nimenomaan sijoituskohteisiin, joita ei pystytä tuottamaan lisää. Blanchard ja Watson (1982, 8–9) toteavat, että hintakuplat syntyvät usein markkinoille, joissa arvonmääritys on haastavaa. Esimerkkinä kulta, jonka arvo teollisessa käytössä poikkeaa sen arvosta sijoituskohteena osana hajautettua sijoitusportfoliota. Kullan hinnan vaikuttavat fundamentaalit ovat sen verran monimutkaisia keskimääräiselle sijoittajalle, joka todennäköisesti tekee päätöksensä keskimääräisten historiallisten tuottojen mukaan. Sijoittaja voi pitää kultaa korkeassa arvossa, sillä se on historiassa tuottanut hyvin.

Usein hintakuplien romahduksen taustalla on nähty tiukennettu rahapolitiikka, jolla on pyritty vähentämään markkinoilla vallinnutta spekulatiivista ilmapiiriä. Helmikuussa 1929 Yhdysvaltojen keskuspankki nosti viitekorkoa viidestä prosentista kuuteen prosenttiin, joka johti osakemarkkinoiden romahdukseen. Keskuspankki jatkoi rahapolitiikan tiukentamista vielä 1930-luvun alussa ja osakemarkkinoiden romahdus jatkui ja kehittyi Yhdysvaltojen historian pahimmaksi lamaksi. (Shiller 2000, 223.) Taipalus (2012, 26) mainitsee hintakuplien syyksi myös markkinoiden infrastruktuurin. Vielä 1920-luvulla osakemarkkinat olivat melko kehittymättömät ja tietoa julkisesti kaupankäynnin kohteena olevista yrityksistä oli vähän. Nykyään markkinoiden struktuuri on säännellympi, mutta globaaleilla markkinoilla häiriöt leviävät nopeasti eri toimijoiden välillä aiheuttaen kriisien leviämisen. Globaalit pääomamarkkinat voivat myös vahvistaa nousuja ja laskuja eri valtioissa johtuen ulkomaisen pääoman lisääntymisestä nousukaudella ja poisvetäytymisestä laskun alkaessa. (Kindleberger & Aliber 2005, 127) Teknologian kehittymisen myötä myös automatisoitu kaupankäynti voi aiheuttaa markkinoiden ylisuuria reaktioita (Taipalus 2012).

Tirole (1985) luo tutkimuksessaan hintakuplista kuvaa talouden tehostajina. Hänen mukaansa hintakupla voi joskus johtaa tasapainotilan kautta tehokkaampaan ratkaisuun taloudessa lisäämällä kulutusta. Hintakuplat voivat myös auttaa varallisuuden tehokkaassa siirtämisessä nuorelta sukupolvelta vanhalle. Hän tuo kuitenkin esiin myös hintakuplissa esiintyviä tehottomuuksia. Ensimmäisenä hän mainitsee *‘Costly bubble*

creation', joka on tilanne, jossa omaisuuserässä on kupla ja tämän vuoksi sen tuotantoa lisätään, vaikka se aiheuttaa kustannuksia. Tämän kaltainen tuotanto ei tuota oikeaa hyvinvointia talouteen. Tällöin tasapaino on tehoton ja todellinen tasapaino olisi tila, jossa tämän omaisuuserän tuotanto kielletään. Toisena esimerkkinä hän esittää *'Nonexhaustion of a market fundamental'*-tilanteen, joka tarkoittaa sitä, että tuotetaan pieni määrä jotain harvinaista hyödykettä, jolloin sen hinta on ylempi kuin saman hyödyn antava melkein identtinen hyödyke. Tämä aiheuttaa hyödykkeen kuluttamatta jättämisen, sillä tämän hetken omistajat miettivät tulevia voittoja, eikä hyödyke tuota hyvinvointia. Tirolen (1985) malli olettaa hintakuplan deterministiseksi, jolloin hintakupla kasvaa jokaisella periodilla koron r verran eikä puhkea koskaan.

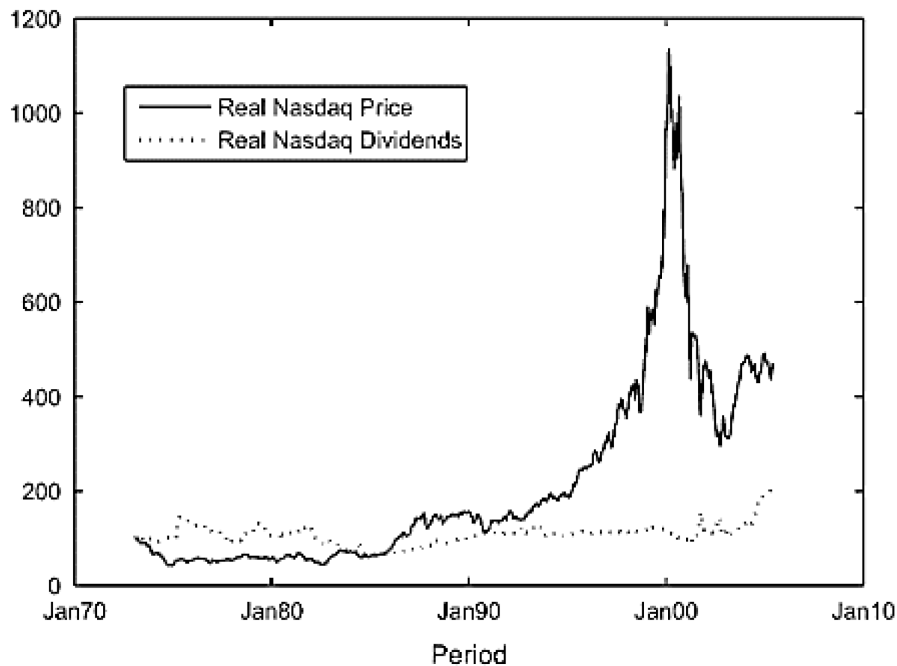
3.2.2 *Historialliset hintakuplat*

Yhtenä kuuluisimpana hintakuplana voidaan pitää Hollannissa 1634–1637 vallinnutta tulppaanisipuleiden hintojen voimakasta nousua ja sitä seurannutta romahdusta. Sitä pidetään ensimmäisenä tiedettynä spekulatiivisena kuplana ja sitä on usein kutsuttu nimellä *'Tulipmania'*, kuvaten spekulointiin liittyvää järjettömyyttä kyseisenä ajanjaksona. (McClure & Thomas 2017.) Tulppaanien suosio kasvoi 1600-luvun alussa kun niiden kysyntä kasvoi erityisesti yläluokan kuluttajien keskuudessa. Kuitenkin hintakuplan voidaan sanoa alkaneen vasta futuurien tullessa markkinoille 1635–1636, suurimman hintojen nousun ollessa aikavälillä 1636–1637. Hintakuplan romahduksen jälkeen laadukkaiden tulppaanien kysyntä jatkui korkeana ja hinnat nousivat edelleen. (Flood & Garber 1980.)

Toinen kuuluisa ja huomiota herättänyt hintakupla on Etelänmeren kupla, joka sai alkunsa 1711 kun Englannissa perustettiin *'South sea company'*-niminen yritys, jonka alun perin oli tarkoitus hoitaa ulkomaan kauppaa Espanjan Amerikan siirtomaiden kanssa. Yhtiö kuitenkin toimi lähinnä lainanantajana valtiolle ja myi osakkeitaan ylihintaan markkinoille. Kurssi romahti syyskuussa 1720, kun sen arvo tippui noin 150 puntaan aiemmasta yli 1000 punnasta. (Temin & Voth 2004.) Samaan aikaan Ranskassa Mississippi-niminen yhtiö romahti samankaltaisen valtion lainoittamisen seurauksena ja hinnan saivat maksaa osakkeenomistajat (Garber 2000, 87–90).

Myöhemmin 1980–90-luvuilla on nähty useita osakemarkkinoiden ja asuntomarkkinoiden dramaattisia nousuja ja sitä seuraavia romahduksia. Japanissa 1980-luvun nousu ja sitä seurannut romahdus, samoin kuin Norjassa, Suomessa ja Ruotsissa 1980–1990-luvuilla. (Allen & Gale 2000, 236.) Tietotekniikan kehitys aiheutti 1990-luvulla teknologiaosakkeiden ”ostobuumin” osakemarkkinoiden ”manian”, jota on kutsuttu usein nimityksellä *'dot.com bubble'* (Kindleberger & Aliber 2005, 1). Kuviossa 3 näkyy 1970–2000-luvulla vallinnut NASDAQ-100 indeksi, joka sisältää 100 suurinta NASDAQ-pörssin

osaketta, sekä vastaavat osingot ajanjaksolta. Dot.com-hintakupla on selvästi havaittavissa kuviossa 90-luvun lopulla, jolloin hinta nousi ensin eksponentiaalisesti ja romahti tämän jälkeen 2000-luvulle tultaessa.



Kuvio 3 Dot.com hintakupla (Homm ja Breitung 2012)

Kasvavissa talouksissa on nähty myös useita finanssikriisejä esimerkkeinä Argentiina, Chile, Meksiko sekä Malesia, Indonesia, Thaimaa ja Etelä-Korea. (Allen & Gale 2000, 236.) Yksi tunnetuimpia hinnan äkillisiä romahduksia 1980–1990-luvulta on *'Black Monday'* 19.10.1987, jolloin yhden päivän aikana DJIA-indeksi Yhdysvalloissa menetti 22 prosenttia arvostaan. Romahdus levisi kaikkiin suuriin pörssiin ja aiheutti osakemarkkinoiden laskun ympäri maailmaa. (Diks ym. 2018.)

Viime vuosien kuuluisimpina kuplina voidaan pitää vuoden 2008 pankkikriisiä, joka eteni finanssikriisistä pankkikriisiksi ja tämän jälkeen vuoden 2010 Euroalueen velkakriisiksi. Globaali kriisi sai alkunsa liiallisesta velkaantumisesta ja etenkin Yhdysvaltojen asuntovelkojen huonosta laadusta ja pankkien ylisuuresta riskinotosta. Yhdysvallat myönsivät huonolaatuisia Subprime-lainoja alhaisen korkotason vallitessa, joka synnytti asuntomarkkinoiden hintojen kasvun ja hintakuplan. (Savona ym. 2011, 21,39.) Asuntokupla puhkesi 2007 loppupuolella, joka aiheutti asuntolainojen myöntäneiden pankkien konkurssiaallon ja suurten investointipankkien kuten Lehman Brothersin, Merrill Lynchin ja Washington Mutualin kaatumisen. (Diks ym. 2018.)

3.3 Rationaalinen hintakupla

Ekonomistien mukaan sijoittajien rationaalisen käytöksen rationaalisten odotusten oletetaan vallitsevan sijoituskohteiden hinnan määrittämisessä taustalla. Mikäli hinta osoittaa jostain muuta kuin markkinafundamenttien kautta laskettua nykyarvoa, voidaan nähdä taustalla olevan irrationaalisuutta. Kuitenkin Blanchard ja Watson (1982, 2–6) osoittavat mallissaan, että on mahdollista, että rationaalisen käytöksen ja odotusten vallitessa hinta voi erota fundamentaalisesta arvosta. He kutsuvat tutkimuksessaan tätä ilmiötä rationaaliseksi kuplaksi. Positiivisen kuplan tapauksessa sijoittajat odottavat korvausta maksaessaan ylihintaa kuplatekijän arvonnousun myötä. Sijoittajat ovat valmiita maksamaan ylihintaa, sillä uskovat, että seuraavissa periodeissa ylihintaa kasvaa entisestään. Sijoittajat ovat silloin rationaalisia, joten siitä nimitys rationaalinen kupla.

Rationaalisen kuplan teoria perustuu siihen, että sijoittajat tiedostavat, että markkinahinnoissa on kupla ja uskovat hyötyvänsä kuplasta myymällä osuutensa voitolla ennen kuplan puhkeamista (Taipalus 2012). Kyseistä hintakuplaa voidaan kutsua myös nimellä rationaalinen spekulatiivinen hintakupla. Blanchardin ja Watsonin (1982, 5) mukaan hintakupla lisää riskiä sijoituskohteessa ja tämän myötä riskiä karttavat sijoittajat vaativat myös suurempaa tuottoa sijoitukselleen.

Tirolen (1982) mukaan tilanteessa, jossa on ääretön aikahorisontti ja ääretön määrä sijoittajia, omaisuuserien hintojen ei tulisi poiketa fundamentaalisista arvoista, mikäli käytös on rationaalista eli hintakuplaa ei voi syntyä. Blanchard ja Watson (1982, 8) todistavat tutkimuksessaan, että äärettömässä aikahorisontissa ja äärettömien sijoittajien tapauksessa myöskään negatiivinen kupla ei ole mahdollinen. Mikäli sijoituskohteen hinta olisi alle sen fundamentaalisen hinnan sijoittajat ostaisivat sijoituskohteen eivätkä myisi sitä enää koskaan, nauttien tuottoja osinkoina. Heidän mukaansa myöskään positiivinen kupla ei ole mahdollinen ikuisella aikajänteellä, sillä se johtaa siihen, että jokainen sijoittaja ostaa tuotteen myydäkseen sen suurempaan hintaan. Tämä johtaa kuitenkin siihen, että jokainen sijoittaja suunnittelee myyvänsä tuotteen tulevaisuudessa tiettyä ajankohdaksi ja tasapainohintaa ei synny. He päätyivät näin samaan lopputulokseen Tirolen (1982) kanssa.

Myöhemmin Tirole (1985) osoittaa, että kun sijoittajia tulee jatkuvasti lisää markkinoille ja vanhoja sijoittajia pysyy myös markkinoilla enemmän kuin yhden periodin on ääretön rationaalinen hintakupla mahdollinen, mutta vain jos talous kasvaa nopeampaa tai samaa vauhtia kuin tuotto-odotus. Tätä mallia kutsutaan limittäisten sukupolvien malliksi *'overlapping generations model'*. Blanchard ja Watson (1982, 8) vertaavat tässä tapauksessa hintakuplaa Ponzi-huijaukseen, joka vaatii uusia sijoittajia säilyäkseen ja maksaakseen vanhoille sijoittajille tuottoja.

Blanchard ja Watson (1982, 10–11) esittivät, että rationaaliset hintakuplat voivat myös vaikuttaa sijoituskohteen fundamentaaliseen arvoon. Esimerkkinä he käyttivät asunto-markkinoita, jossa arvoa voidaan mitata maan arvolla ja rakennelmien arvolla. Tehokkailla markkinoilla asunnon hinta vastaa diskontattua arvoa tulevista vuokrista. Mitä enemmän tarjontaa asunnoista sitä alhaisempi vuokra. Hintakuplan vallitessa näillä markkinoilla, asuntoja rakennetaan enemmän, sillä niistä saatava tuotto on korkeampi, josta seuraa vuokrien aleneminen tulevaisuudessa. Hintakupla vaikuttaa tällä tavoin sijoituskohteen fundamentaaliseen arvoon. Hintakupla johtaa yhä suurempaan asuntojen tarjontaan ja alhaisempaan vuokraan, ja ylitarjonta johtaa lopulta kuplan puhkeamiseen ja hintojen putoamiseen alhaisemmalle tasolle kuin alkuperäinen fundamentaalinen arvo. Mikäli maa-alue ei riitä asuntojen rakentamiseen, voi ylitarjonta loppua ja hintojen nousu kohdistua maa-alueen hintoihin.

Blanchard ja Watson (1982, 12) esittävät myös, että hintakupla esimerkiksi tietyssä hyödykkeessä voi vaikuttaa toisen hyödykkeen hintaan. Hintakuplan ollessa tietyssä sijoituskohteessa sen hinnan nousu vaikuttaa myös varoihin, joita tähän kohteeseen sijoitetaan ja varallisuuden kasvuun. Hintakuplan sisältämän sijoituskohteen odotetut tuotot nousevat ja toisen ei-substituuti sijoituskohteen odotetut tuotot laskevat. Varallisuuden kasvu voi johtaa hyödykkeiden ja rahan kysynnän kasvuun, joka kasvattaa keskimääräistä odotettua tuottoa. Tämä johtaa lopulta muiden sijoituskohteiden hinnan laskuun ja hintakupla hyödykkeen fundamentaalisen hinnan laskuun myöhemmin kuplan puhjetessa. Esimerkiksi kiinteistöissä oleva hintakupla voi johtaa lopulta osakekurssien laskuun.

3.4 Epärationalinen hintakupla

Epärationalisissa kuplateorioissa lähtökohtana on se, että ainakin osa sijoittajista toimii epärationalisesti. Mikäli sijoituskohteen hinta poikkeaa markkinafundamenttien määrittämästä hinnasta, sitä voidaan pitää todisteena epärationalisuudesta. Blanchardin ja Watsonin (1982, 1) mukaan markkinaosapuolet ovatkin usein sitä mieltä, että sijoituskohteiden hintaan vaikuttavat muutkin asiat kuin tulevien kassavirtojen nykyarvo. Hintojen taustalla uskotaan toimivan myös psykologisia tekijöitä, esimerkiksi ”joukkopsykologia”. Epärationalisten kuplien mallintaminen käytetään käyttäytymistieteellisiä malleja, jotka sallivat epärationalisen hinnoittelun (Gurkaynak 2005, 2).

Psykologiassa on havaittu ilmiö, jossa ihmiset, jotka kommunikoivat usein toistensa kanssa, ajattelevat myös samalla tavalla asioista. Samankaltainen lauma-ajattelu on läsnä myös spekulatiivisessa käytöksessä osakemarkkinoilla. Jos kaikki sijoittajat ajattelisivat itsenäisesti, virheelliset hinta-arviot eivät vaikuttaisi osakemarkkinoihin muodostaen markkinoiden jyrkkiä nousuja ja laskuja. Osasyynä samankaltaiseen ajatteluun on ihmis-

ten reaktiot samoihin julkisesti tiedotettuihin tapahtumiin, mutta taustalla on myös psykologisia tekijöitä, kuten se, että ihminen ei halua olla ryhmässä se, joka on ainoana väärässä, jolloin ryhmäpaine vaikuttaa päätöksiin. Myös auktoriteetin mielipiteen on havaittu vaikuttavan vahvasti päätöksentekoon. Lauma-ajattelu '*herd behaviour*' osakemarkkinoilla voi johtaa siihen, että sijoittaja ei käytä energiaa osakkeen fundamentaalisen arvon määrittelyyn, vaan perustaa sijoituspäätöksensä muiden sijoittajien toimintaan. Tämä johtaa epärationaalisuuteen osakemarkkinoilla ja voi johtaa esimerkiksi hintakuplan syntyyn. (Shiller 2000, 148–152.)

Tehokkaiden markkinoiden hypoteesin mukaan kaiken oleellisen informaation tulisi heijastua sijoituskohteiden hintoihin välittömästi tiedon tullessa markkinoille. Käyttäytymistaloustieteessä mielenkiinto siirretään markkinaosapuolten käyttäytymisen ja psykologisten tekijöiden tarkasteluun, jolloin pyritään selittämään epärationaalista käyttäytymistä. (Naseer & Tariq 2015.)

Epärationaalinen spekulatiivinen hintakupla perustuu psykologisiin tekijöihin, kuten tunnetiloihin, jolloin epärationaaliset ja ylioptimistiset odotukset yllyttävät sijoittajia ottamaan osaa markkinoihin hintakuplan paisumisvaiheessa. (Shiller 2000, 135–136.) Shiller (2017) sanoo, että Bitcoin on paras esimerkki tämän päivän spekulatiivisesta hintakuplasta ja tukee väittämäänsä lainauksella kirjastaan. Kirjassaan hän kuvailee hintakuplaa tilanteeksi uutiset hinnan noususta yllyttää sijoittajien innostusta entisestään, joka leviää psykologisen tartunnan kautta ihmiseltä toiselle. Hinnan nousun taustalla olevien fundamentaalisten tekijöiden liioittelu johtaa yhä useamman sijoittajan tuloon markkinoille, jotka eivät ole kiinnostuneita arvonmäärytyksestä, vaan haluavat osansa kurssin noususta. Hän selittää siis Bitcoinin hinnan vaihtelua erityisesti psykologisten tekijöiden kautta.

3.5 Rahan hintakuplat

On todistettu, että joissain talouksissa rahalla on positiivinen arvo, vaikka valuutalla ei todellisuudessa ole mitään itseisarvoa. Jos kupla määritellään markkina-arvon ja markkinafundamenttien erotuksena voidaan sanoa, että raha on itsessään kupla. (Samuelson, 1958.) Samuelsonin (1958) mallissa on kaksi aikaperiodia ja on sekä nuoria, että vanhoja sukupolvia ja molemmat sukupolvet haluavat kuluttaa. Nuoret sukupolvet ansaitsevat rahaa tai hyödykkeitä ja säästävät tätä varallisuutta tulevaisuuteen, koska vanhana he eivät ansaitse enää mitään. Vanhat sukupolvet ostavat hyödykkeitä nuorilta sukupolvilta rahalla, jolle muodostuu säästämisen kautta sen fundamentaalista arvoa korkeampi hinta.

Tirole (1985) toteaa, että raha eroaa muista sijoituskohteista, sillä sen fundamentaalinen arvo, ei ainoastaan hinta, on riippuvainen tulevista hinnoista. Jos oletetaan, että rahansiirrosta saatava arvo säilyy ei voida sanoa, että raha olisi kupla. Hän painottaa myös,

että kuplan määritelmä hinnan eroamisena fundamentaalisesta arvosta on joidenkin sijoituskohteiden kohdalla liian yksinkertaistettu.

Tirolen (1985) mukaan hintakuplien esiintyminen rahassa on kiistanalainen asia ja hän tarkastelee tutkimuksessaan kahta eri näkemystä. Ensimmäinen on fundamentaalinen näkemys, jossa oletetaan, että rahaa säilötään, jotta voidaan tehdä rahoitustransaktioita. Tämän vuoksi rahan täytyy olla *'store of value'* eli arvon säilyttäjä. Sitä ei pidetä siis spekulatiivisessa tarkoituksessa eikä rahassa ole näin hintakuplaa. Toinen näkemys *'bubbly view of money'* pitää rahaa arvonsäilyttäjänä, jonka arvo kasvaa reaalisen korkotason mukaisesti ja rahaa säilötään vain spekulatiotarkoituksessa. Rahassa itsessään ei tässä näkemyksessä ole siis fundamentaalista arvoa. Tirolen (1985) mukaan realistisemman kuvan antaa fundamentaalinen näkemys, joka selittää rahan alhaisen tuotto-odotuksen verrattuna muihin sijoituskohteisiin sekä mahdollistaa inflaation huomioon ottamisen mallissa. Näkemystä tukee myös se, että raha on säilyttänyt hyvin arvonsa huolimatta sen jatkuvasta tuotannosta.

Diba ja Grossman (1988b) toteavat, että valuutassa olevan rationaalisen hintakuplan odotusarvo on nolla, mikäli hintakupla alkaa valuutan liikkeeseen laskun jälkeen. Rationaalisten deflatoristen hintakuplien ollessa mahdottomia, tulee hintakuplan alkuarvon olla ei-negatiivinen ja keskiarvoltaan nolla. Tämän seurauksena rationaalinen inflatorinen hintakupla on mahdoton, ellei se synny heti valuutan liikkeelle laskun yhteydessä. Taustalla on tämän lisäksi oletus, että markkinaosapuolet, jotka odottivat valuutan liikkeellelaskua, odottivat myös rationaalisen inflatorisen hintakuplan syntymistä. Heidän mukaansa inflatorinen hintakupla ei myöskään romahtamisen jälkeen voi alkaa uudelleen. Hintakuplan tulee alkaa liikkeelle laskupäivänä ja hintakupla voi pienentyä ajoittain, mutta lopullinen romahtaminen voi tapahtua vain kerran.

4 HINTAKUPLIEN TILASTOLLINEN MALLINTAMINEN

4.1 Hintakuplien mallintaminen

4.1.1 Taustaa

Rationaalinen hintakupla voidaan määritellä tulevaisuuden diskontattujen kassavirtojen esimerkiksi osinkojen summana ja tästä saadun fundamentaalisen arvon erona markkinahintaan. Mikäli tätä pidetään kuplan määritelmänä, on tärkeää ensin määrittää sijoituskohteen fundamentaalinen arvo. (Craine 1993.)

Rationaalisella kuplalla tarkoitetaan sijoittajien rationaalista käyttäytymistä ja odotuksia sijoituskohteen arvon noususta. Rationaalisen kuplan kohdalla sijoittajat tiedostavat, että osakkeen arvo on ylittää sen diskontattujen kassavirtojen summan, mutta ovat valmiita maksamaan enemmän, sillä uskovat hintojen nousevan tulevaisuudessa. Tällöin hintojen tasapainotila on tämän hetkinen hinta, johon sisältyy rationaalisen kuplan tekijä. (Craine 1993.)

Blanchard ja Watson (1982, 2) kuvaavat sijoituskohteen tuottoprosenttia kaavalla:

$$(1) \quad R_{t+1} = \frac{P_{t+1} - P_t + d_t}{P_t},$$

missä P_t on sijoituskohteen hinta ja x_t suora tuotto sijoituskohteesta, joka voi tarkoittaa osinkoa, vuokraa tai muuta ei-rahamääräistä tuottoa. Tällöin odotettu tuotto $E(R_{t+1}|\Omega_t) = r$, jossa Ω_t kuvaa kaikilla sijoittajilla olevaa informaatiota hetkellä t . Kaava (1) voidaan silloin esittää muodossa:

$$(2) \quad E(P_{t+1}|\Omega_t) - P_t + x_t = rP_t$$

Gurkaynak (2005, 6) esittää sijoituskohteen hinnan kaavan muodossa:

$$(3) \quad P_t = \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{1}{1+r}\right)^i E_t(d_{t+i}) + \lim_{i \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{1+r}\right)^i P_{t+i},$$

missä sijoituskohteen hinta muodostuu diskontatusta osinkovirrasta d_t ja jälleenmyyntihinnasta. Mallissa kuvataan ääretön aikajänne, jonka seurauksena sijoituskohteen hinta lähestyy nollaa ja hinta muodostuu näin ainoastaan tulevista kassavirroista. Mikäli sijoituskohteessa olisi positiivinen hintakupla ja P_{t+1} termi olisi suurempi kuin nolla, niin sijoituskohteen hinta olisi suurempi kuin diskontatut kassavirrat ja rationaalinen sijoittaja

myysi omistuksensa. Tässä tilassa kaikki sijoittajat haluaisivat myydä sijoituskohteensa ja hinta laskeutuisi jälleen fundamentaaliselle tasolle.

Evansin (1991) mukaan sijoituskohteen hintaa ajanhetkellä " t " voidaan kuvastaa yhden periodin mallissa kaavalla:

$$(4) \quad P_t = \frac{E_t(P_{t+1} + d_{t+1})}{(1+r)},$$

missä P_t on tämän hetken hinta, osoittajana kaavassa on odotettu hinta ja osinko hetkellä $t + 1$ ja nimittäjänä diskonttauskorko, joka on tässä mallissa vakio, ajassa muuttumaton. P_t kuvastaa sijoituskohteen jälleenmyyntihintaa. Diskonttauskorko voi olla kaavassa myös ajassa muuttuva, jolloin se kuvastaa paremmin todellisuutta.

Osakkeen fundamentaalisen arvon saa johtamalla tästä kaavasta ja myös kaavan (3) mukaan:

$$(5) \quad F_t = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{E_t(d_{t+i})}{(1+r)^i}.$$

Kaavassa tulevaisuuden odotetut osinkovirrat diskontataan ajanhetkeen " t ".

Rationaalisen kuplan sisältämä sijoituskohteen hinta voitaisiin puolestaan esittää seuraavasti sijoituskohteen fundamentaalisen arvon ja satunnaisen kuplatekijän summana:

$$(6) \quad P_t = F_t + B_t,$$

missä kuplatekijä B_t ajanhetkellä t on diskontattu odotettu kuplatekijän arvo, joka on esitetty kaavassa (7) (Evans 1991).

$$(7) \quad B_t = \frac{E_t(B_{t+1})}{(1+r)}$$

Blanchard ja Watson (1982, 4) esittävät tutkimuksessaan kaksi mallia rationaalisille hintakuplille. Ensimmäinen niistä on niin sanottu deterministinen malli, jossa hintakupla esitetään kaavalla: $c_t = c_0 \theta^{-t}$, ($\theta = (1 + r)^{-1}$). Tässä mallissa kuplatekijä kasvattaa arvoaan joka periodi koron r verran. Malli on kuitenkin käytännössä mahdoton, sillä kuplan tulisi jatkua ikuisesti. Kun otetaan malliin mukaan hintakuplan romahtamisen todennäköisyys, muuttuu malli hieman. Blanchardin ja Watsonin (1982, 4) mukaan hintakupla lisää riskiä sijoituskohteessa ja tämän myötä riskiä karttavat sijoittajat vaativat suurempaa tuottoa sijoitukselleen. Myös sijoituskohteen hinnan oletetaan tällöin kasvavan nopeampaa tahtia ja samalla todennäköisyys hintakuplan romahdukseen kasvaa jokaisella pe-

riodilla, kun romahdusta ei ole. He kuvaavat hintakuplaa mallilla, jossa todennäköisyydellä π hintakupla c_t jatkaa olemistaan ja todennäköisyydellä $1 - \pi$ hintakupla romahtaa seuraavasti:

$$(8) \quad \begin{aligned} c_t &= (\pi\theta)^{-1}c_{t-1} + \mu_t, & \text{tn. } \pi \\ c_t &= \mu_t, & \text{tn. } 1 - \pi, \end{aligned}$$

missä θ on diskonttaustekijä $(1 + r)^{-1}$ ja c_t on sijoituskohteen hintayhtälön kuplatekijä. Kuplatekijän odotettu arvo maailmantilassa, jossa kupla romahtaa on nolla eli $E(\mu_t|\Omega_{t-1}) = 0$. Niin kauan, kun kupla säilyy, on sen keskimääräinen tuotto suurempi kuin korko r , jotta tuotto korvaa sijoittajan ottamaa riskiä. Mikäli todennäköisyys π kasvaa tietyntä ajankohtana, c_t kasvaa vähenevällä eksponentiaalisella vauhdilla. Jos todennäköisyys π laskee c_t kasvaa voimakkaasti niin kauan, kunnes hintakupla romahtaa. Tässä mallissa hintakupla kasvaa itsenäisesti riippumatta fundamentaalisesta arvosta. Blanchard ja Watson (1982) osoittavat kuitenkin, että on myös mahdollista, että fundamentaalinen arvo ja kuplatekijä ovat kytköksissä toisiinsa.

Blanchard ja Watson (1982, 4–6) käyttävät esimerkkinä osaketta, joka liittyy sodan käyntiin, joka maksaa 1 jokaisella periodilla, kun sotaa käydään ja 0 kun sotaa ei käydä. Sodan alkaessa jokaisella periodilla todennäköisyydellä π sota jatkuu ja todennäköisyydellä $(1 - \pi)$ sota päättyy lopullisesti. Fundamentaalista arvoa voidaan tällöin merkitä:

$$(9) \quad p_t^* = \sum_{i=0}^{\infty} \theta^{i+1} E(x_{t+i}|\Omega_t) = \sum_{i=0}^{\infty} \theta^{i+1} \pi^i = \theta(1 - \theta\pi)^{-1}$$

missä $\theta = (1 + r)^{-1}$, on diskonttaustekijä ja hinnasta muodostuu vakio, niin kauan kun sota on käynnissä. Hinta voi kuitenkin nousta yli arvon p^* kun sijoittajat odottavat tulevaisuuden hinnan nousua sodan aikana. Tästä voi muodostua hintakupla, joka voidaan esittää muodossa $c_t = c_0$. Jos sota on hetkellä $t + i$, hintakupla saa arvon:

$$(10) \quad c_{t+i} = (\theta\pi)^{-1}c_{t+i-1},$$

missä c_{t+i-1} on aikaisemman periodin kupla, joka kerrotaan termillä $(\theta\pi)^{-1}$. Hintakuplan kerroin voidaan esittää myös muodossa $(1 + r)\frac{1}{\pi}$, missä nähdään korkotekijä ja sodan todennäköisyyden vaikutus hintakuplaan. Mitä pienemmällä todennäköisyydellä sota jatkuu, sitä suurempi on kerroin $\frac{1}{\pi}$ ja sitä suurempi kasvu hintakuplassa. Jos sotaa ei ole $c_{t+i} = 0$. Tämä johtaa osakkeen hinnan nousuun yli sen fundamentaalisen arvon heilalussa, hinnan nousuun lisää sodan aikana ja lopulta romahdukseen, joka koskee sekä fundamentaalista arvoa että hintakuplaa.

Evansin (1991) mukaan rationaaliset kuplat voivat olla deterministisiä trendejä aikasarjoissa, räjähdysmäisiä AR(1) prosesseja tai monimutkaisempia stokastisia prosesseja. Evans (1991) määrittää mallin myös positiivisille jaksoittain romahtaville kuplille *'periodically collapsing bubbles'*.

$$(11) \quad B_{t+1} = \gamma^{-1} B_t v_{t+1}, \quad \text{jos } B_t \leq \alpha$$

$$B_{t+1} = [\delta + (\gamma\pi)^{-1} \theta_{t-1} (B_t - \gamma\delta)] v_{t+1}, \quad \text{jos } B_t > \alpha,$$

jossa δ ja α ovat positiivisia parametreja ja $0 < \delta < \gamma^{-1}\alpha$. Tekijä v_t on ajassa satunnaisesti liikkuva stokastinen prosessi, missä $v_t \sim iid(\mu, \sigma)$ ja sen odotettu tuotto $Ev_t = 1$ ja varianssi 0. Tämä varmistaa, että kupla on positiivinen. Bernoullin prosessia kuvaa θ , joka ottaa arvon 1 todennäköisyydellä π ja arvon 0 todennäköisyydellä $1 - \pi$. Ensimmäinen kaava kuvaa vaihetta, jossa kupla kasvaa keskikorolla γ^{-1} . Toinen kaava taas kuvaa tilannetta, jossa kupla ylittää raja-arvon α ja kasvaa entistä nopeammin korolla $\gamma^{-1}\pi^{-1}$. Tämä vaihe ei kuitenkaan ikuisesti, sillä kupla romahtaa todennäköisyydellä $1 - \pi$ joka periodi.

4.1.2 Tutkimusmenetelmät

Kiinnostus kuplien testaamiseen ja ennakkointiin on lisääntynyt viime vuosikymmeninä ja erityisesti vuoden 2008 finanssikriisin jälkeen. Kuplien ennakkointi ja ehkäiseminen on haastavaa ja malleja onkin pyritty löytämään, sillä talouden palautuminen kriisien jälkeen voi viedä vuosikymmeniä. Viime aikaisen empiirisen tutkimuksen mukaan aikasarjadatan avulla voidaan testata hintakuplia aineistossa ja analysoida niitä rahoitusteorian avulla. Hintakuplan olemassaolo pitäisi pystyä arvioimaan aikasarjadatan stokastisten ominaisuuksien kautta. (Caspi 2013, 1–2.)

Ensimmäisiä kuplien tunnistusmenetelmiä ovat olleet niin kutsutut *'variance bounds'*-testit, joita ei alun perin käytetty kuplien ennakkointiin, mutta myöhemmin niitä on sovellettu tähän tarkoitukseen (Gurkaynak 2005, 7–11). Taustalla oli ajatus siitä, että todellisen osakeindeksien volatilitteetti on paljon suurempaa kuin aikasarjan, joka on laskettu diskonttaamalla tulevia kassavirtoja (Shiller 1981). LeRoyn ja Porterin (1981) ja Shiller (1981) tutkimuksessa y_t^* kuvaa tulevien kassavirtojen diskontattuja todellisia arvoja *'ex post'* ja vastaavasti $y_t = E(y_t^*)$ kuvaa hintojen ennustamista historiallisista arvoista *'ex ante'*. Tästä seuraa, että $y_t^* = y_t + \pi_t$, jossa π_t kuvaa diskontattuja satunnaisia virhetermejä. Tällöin tilastollisesti riippumattomien termien tapauksessa tulisi olla $Var(y_t^*) =$

$Var(y_t) + Var(\pi)$. Tästä johtuen hinnalla muodostuu varianssirajat, jolloin eroavaisuudet variansseissa kertovat tehottomuudesta ja mahdollisesta hintakuplasta.

West (1987) paransi kuplien tutkimusmenetelmiä, sillä hänen mallinsa oli kehitetty nimenomaan testaamaan mallia, jossa hintakupla on vastahypoteesina. Kaksiportaisessa testissä pyrittiin yhdistämään hintakuplien testaaminen ja mallin kelpoisuuden testaaminen eli niin sanotut diagnostiset testit. West (1987) käytti testissään kahta eri tapaa tutkia osinkojen suhdetta osakkeen hintaan; Eulerin yhtälö ja autoregressiivinen malli. Osinko-hinta-suhteen tulisi antaa eri malleilla laskettuna sama vastaus tai muuten kyseessä on hintakupla. Ennen johtopäätösten vetämistä tuli malleille suorittaa diagnostiset testit, jotta hintakuplan olemassaolo voitiin päätellä.

Aikaisemmat tutkimusmenetelmät olivat keskittyneet tutkimaan sijoituskohteen hinnan muodostusta ja poikkeamia fundamentaalisesta arvosta, mutta Diba ja Grossman (1988a) kiinnittivät huomion nimenomaan hintakuplan ominaisuuksien tarkasteluun. Heidän mukaansa hintakupla ei ole mahdollinen, mikäli osakkeen hinta ja osinko ovat molemmat aluksi epästationaarisia, mutta stationaarisia ensimmäisen differenssin jälkeen. Mikäli osinkojen epästationaarisuus on syynä osakkeen hintojen epästationaarisuuteen, ovat ne kointegroituneita, joka viittaa siihen, että hintakuplaa ei ole. Heidän mukaansa hintakupla ei voi alkaa uudelleen ja romahtaa vaan positiivisen rationaalisen hintakuplan on täytynyt alkaa osakkeen tullessa markkinoille, eikä hintakupla voi alkaa uudelleen. Evans (1991) kritisoi Diban ja Grossmanin tutkimusta, sillä se ei havainnut hintakuplia, jotka romahtivat ja alkoivat uudelleen, mutta pysyivät positiivisina. Tämä johtui siitä, että hintakupla, joka nousee ja romahtaa ja nousee jälleen vaikuttaa testin mukaan enemmän stationaariselta aikasarjalta. Kuitenkin esimerkiksi Evans (1991) osoitti tutkimuksessaan niin sanottujen jaksottaisesti romahtavien kuplien olemassaolon, jotka alkavat aina uudelleen romahduksen jälkeen.

'*Markov-switching model*' perustuu olettamukseen, että aikasarjalla on eri jakauma tietyllä ajanjaksolla ja siirryttäessä ajanjaksosta toiseen mallin olettamukset muuttuvat. Mallissa vaihtuminen ajanjaksosta toiseen on riippuvainen todennäköisyydestä, joka sisällytetään malliin. (Smith 2002.) '*Markov-switching*'-malliin perustuva yksikköjuuri-testi havaitsee muutoksia aikasarjadatasta ja sitä voidaan käyttää rationaalisten hintakuplien havaitsemiseen myös, kun ajanjaksolla on useita hintakuplia. Kriittiset arvot joihin yksikköjuuritestin arvoja verrataan, saadaan bootstrapping-menetelmällä. (Shi 2013.) Malliin perustuvan ADF-testauksen on todettu havaitsevan jaksottaisia kuplia paremmin kuin perinteisten yksikköjuuritestien.

Uusimmat hintakuplan havaitsemisstrategiat perustuvat itseään toistaviin ja rullaaviin yksikköjuuritesteihin, joiden avulla datasta voidaan löytää useita hintakuplia ja niiden esiintyvyys voidaan aikaleimata. Aineistoa testataan oikea häntäistä yksikköjuurta, jossa nollahypoteesi on yksikköjuuri ja vastahypoteesi on kuplan merkkejä havaitseva '*mildly*

explosive process'. Nämä testit pystyvät havaitsemaan useita kuplia aikasarjassa ja ovat tehokkaampia reaaliaikaisina hintakuplien havaitsemismenetelminä. (Phillips ym. 2015.)

4.1.3 Kryptovaluuttojen arvonmääritys

Kryptovaluutoissa esiintyviä hintakuplia on tutkittu vain vähän, vaikka sääntelemättömät markkinat ja arvonmäärityksen vaikeus ovat hintakuplille otollinen lähtökohta (Blanchard ja Watson 1982, 8–9.) Arvonmääritystä vaikeuttaa myös hinnan suuri volatilitteetti, joka vaikeuttaa perustellun analyysin ja hinnanmäärityksen tekemistä (Hayes 2017). Fundamentaalisien arvon määrittäminen on haastavaa, sillä sijoituskohteella ei ole jatkuvia tulovirtoja kuten esimerkiksi osakkeilla tai kiinteistösijoituksilla (Lo & Wang 2014, 7). Kryptovaluuttojen kohdalla ongelmana on myös se, minkälaiseen sijoituskohteeseen sen luetaan kuuluvaksi. Perinteisissä kryptovaluuttojen hintakuplia mallintavissa kaavoissa osinkotermi on usein korvattu. Esimerkiksi Li ym. (2018) Bitcoinia koskevassa tutkimuksessa osinko on korvattu taloudellisilla fundamenteilla, joiden on arvioitu voivan vaikuttaa Bitcoinin hintaan. Bitcoinin fundamentaalinen arvo muodostuu tällöin kaiken odotetun taloudellisen tiedon nykyarvosta.

Tirolen (2017) mukaan Bitcoin on itsessään jo hintakupla, sillä sen arvo perustuu ainoastaan ihmisten luottamukseen. Tämä tarkoittaisi, että kryptovaluutoilla ei olisi lainkaan fundamentaalista arvoa. Kryptovaluuttojen arvo on kuitenkin markkinoilla edelleen korkea, hintojen heilahteluista huolimatta, ja OTC-markkinoilta sekä johdannaismarkkinoilta löytyy kryptovaluuttojen arvoon sidottuja sijoitustuotteita. Arvoa tuottavina tekijöinä voidaan nähdä mahdollisuus käyttää valuuttaa ilman keskuspankin valvontaa ja mahdollisuus avata pankkitili huolimatta maantieteellisestä sijainnista tai tulotasosta. (Hayes 2017.)

Hayes (2017) tutkii 66 eri kryptovaluutan hintoja, vertailemalla Bitcoinin tuotantoa eri kryptovaluuttojen tuotantoon. Tutkimuksen perusteella Bitcoinin arvo voidaan johtaa sen tuotantokustannuksista. Bitcoinin arvon muodostuu hänen mukaansa pääosin sen sähkön kulutuksen kustannusten mukaan. Arvoon vaikuttaa tämän lisäksi louhinnan vaikeus ja tehokkuus lohkoketjussa.

Yermack (2013, 9) mukaan kryptovaluutoilla ei ole mitään itseisarvoa, vaan arvo perustuu ainoastaan sen käyttöön kuluttajien maksuvälineenä. Hayes (2017) taas näkee, että kryptovaluutoilla on itseisarvo, jota ei voi suoraan verrata perinteisten sijoituskohteiden, kuten kullan, itseisarvoon sen virtuaalisten ominaisuuksien vuoksi. Van Alstyne (2014) näkee kryptovaluuttojen arvon taustalla teknologisen arvon, jota se on luonut ratkaistessaan kaksinkertaisen kulutuksen ongelman. Yrityksille arvoa luo se, että transaktioiden kustannukset ovat maksun vastaanottajalle lähes nolla, kun taas luottokorttiyhtiöt voivat veloittaa myyntitapahtumista noin 2–3 prosenttia. Pienet yritykset voivat päätyä jopa

poistamaan luottokorttimaksumahdollisuuden, sillä kulut vievät suuren osan katteesta. Edullisempi vaihtoehto tekisi kuluttamisen helpommaksi ja johtaisi näin molempien osapuolien tyytyväisyyteen ja kulutuksen kasvuun. Arvoa luo myös se, että kryptovaluutat voivat helpottaa petosten ehkäisyä, sillä jokaisen tapahtuman hyväksyntään tarvitaan julkisen lohkoketjun hyväksyntä ja tapahtumat eivät ole peruttavissa jälkikäteen. Samalla lohkoketju lisää transaktioiden läpinäkyvyyttä, sen ollessa kaikkien osapuolten nähtävillä.

Kristoufek (2013, 1) toteaa, että kryptovaluuttojen kaltaisia hinnan nousuja ja laskuja on vaikeaa selittää tämän hetken rahoitusteorioiden, kuten tulevaisuuden kassavirtamallien tai ostovoimapariteettimallien kautta. Kryptovaluutat ovat voimassa vain digitaalisesti bitteinä, joten niiden koko olemassaoloa voidaan pitää melko abstraktina. Kryptovaluuttojen fundamentaalista arvoa ei voida johtaa tavallisten valuuttojen tapaan kysynnän ja tarjonnan kautta, jotka ovat riippuvaisia liikkeelle laskeneen maan makrotalouden muuttujista, kuten BKT:sta, korkotasosta, työttömyydestä ja inflaatiosta. Kryptovaluuttojen tarjonta määräytyy ennalta määrätyn tietokonealgoritmin mukaan tai se on asetettu ohjelmoinnissa kiinteäksi. Kryptovaluuttojen kysynnän taustalla voidaan nähdä odotetut tuotot sijoituskohteen myymisestä myöhemmin. Kryptovaluutoista ei makseta myöskään korkoa, joten sijoituskohteen pitäminen omistuksessa ilman tulevaisuuden voittojen spekulointia, ei ole kannattavaa. Markkinoita dominoi tämän vuoksi spekulatiiviset lyhyen aikavälin sijoittajat. Markkinoilla ei siis ole hänen mukaansa rahoitusteorian mukaisia fundamentaaleja, joihin hintaa voisi perustaa.

Kristoufek (2013, 2, 5) näkeekin hinnanmäärityksen taustalla tärkeimpänä tekijänä sijoittajan käyttäytymisen ennustamisen, jolloin lähestymistapa on käyttäytymistaloustieteellinen. Hän käyttää Google Trends - ja Wikipedia-hakuja ja tarkastelee niiden vaikutusta Bitcoinin hintaan. Hän havaitsee vahvaa korrelaatiota hakujen ja Bitcoinin suhteellisten hinnan muutosten välillä. Yhteys löytyy myös hinnan nousun ja sitä seuraavien hakujen välillä. Hän havaitsee myös, että kun hinnat ovat korkeita (yli trendin), kiinnostus lisääntyy, joka johtaa hintojen nousuun entisestään. Toisaalta kun hinnat ovat alhaalla, kiinnostuksen lisääntyminen työntää hinnat entistä alemmas. Tämä muodostaa markkinat, jotka ovat alttiita hintakuplien syntymiselle. Ciaian ym. (2016) päätyvät samaan tulokseen, sillä heidän mukaansa Bitcoinin hinnan taustalla vaikuttaa erityisesti uuden informaation tulo markkinoille. Vaikutus oli kuitenkin suurempi Bitcoinin alkuaikoina, mitä se on nykyään.

4.1.4 Hintakuplat kryptovaluutoissa

Shiller (2017) kuvailee Bitcoinia spekulatiiviseksi hintakuplaksi ja lisää, että hinnan vaihtelua kuvaasi paremmin nimitys ”spekulatiivinen epidemia”, sillä spekulatiiviset hintakuplat toimivat hänen mukaansa, kuten epidemiat, jotka nousevat esiin aika-ajoin muuttaen aina muotoaan. Tirolen (1985) mukaan hintakuplan määritelmä hinnan eroamisena fundamentaalisesta arvosta onkin joidenkin sijoituskohteiden kohdalla liian yksinkertaistettu. Hintakuplien tutkiminen kryptovaluutoissa toimii hyvänä esimerkkinä, sillä yleisesti hyväksyttyä arvonmäärityskeinoa ei ole löydetty ja silti monet ovat yksimielisiä hintakuplan olemassaolosta.

Kreuser ja Sornette (2018, 2) tutkivat Bitcoinin hintakuplia käyttämällä rationaalisten odotusten hintakuplamallia. Mallissa sijoituskohteen hinta on määritelty geometrisenä Brownin liikkeenä ja siinä esiintyvinä ”hyppyinä”, jotka voidaan yhdistää positiivisiin ja negatiivisiin hintakupliin. Tutkimuksessa havaitaan joulukuun 2017 hintakupla, jolloin kryptovaluuttojen hintojen nousu oli kaikista voimakkainta. Hintakuplia Bitcoinissa ja muissa kryptovaluutoissa on pyritty tutkimaan myös fundamentaalista arvoa määrittämällä. Wheatley ym. (2018, 3–4, 13–14) käyttivät Bitcoinin fundamentaalisen arvon määrittämisen perustana Metcalfen lakia, jonka mukaan arvo on suoraan verrannollinen verkon käyttäjien lukumäärän neliöön. Hintakuplien havaitsemiseen käytettiin LPPLS *’Log-Periodic Power Law Singularity’*-mallia, joka havaitsee kestäättömän, eksponentiaalisen hinnan nousun. LPPLS-malli osoittautuu tehokkaaksi havaitsemaan hinnan muutoksia aikasarjassa ex-ante. Metcalfen lain mukaan laskettu fundamentaalinen arvo osoittautuu neljä kertaa alhaisemmaksi kuin vallitseva alkuvuoden 2018 hinta.

Corbet ym. (2018) taas käyttivät samaa GSADF-menetelmää kuin Cheung ym. (2015) ja pyrkivät havaitsemaan hintakuplia Bitcoinin ja Ethereumin aikasarjadatasta ja käyttivät hintakuplien merkitsemiseen BSADF-menetelmää. He tutkivat GSADF-testin rinnalla myös tekijöitä, jotka voidaan nähdä fundamentaaliseen arvoon vaikuttavina tekijöinä, kuten louhinnan vauhti, joka mittaa verkoston konetehon määrää, päivittäisten transaktioiden määrä eli likviditeetti ja lohkon koko. Tutkimuksen tulokset ovat ristiriitaisia, sillä hintakuplia havaitaan GSADF-menetelmällä, mutta fundamentaaleiksi arvioitujen muuttujien avulla ei pystytä varmentamaan, ovatko hinnan muutokset fundamentaaleista johtuvia vai todellisia spekulatiivisia hintakuplia. Syynä tähän on toistaiseksi riittämättömät mittarit kryptovaluuttojen hinnanmääritykseen.

Hintakuplien ekonometrisessä tarkastelussa hyödynnetään usein faktaa siitä, että hintakuplakomponentti on epästationaarinen prosessi. (Gurkaynak 2005, 4) Sijoituskohteen hintaan voidaan nähdä vaikuttavan osinkojen lisäksi myös ei-havaittavissa olevat tekijät *’unobservable fundamentals’*, jolloin fundamentaalien ja hintakuplan tunnistaminen erillisinä muuttuu haastavaksi. Ei-havaittavia fundamentaaleihin vaikuttavia tekijöitä voivat

olla esimerkiksi sijoittajan rationaaliset odotukset tulevaisuuden verotuksesta tai eri tapahtumien vaikutukset hintoihin. (Diba ja Grossman 1988a.) Phillips ym. (2015) kuvaa sijoituskohteen hintaa kaavalla:

$$(12) \quad P_t = \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{1}{1+r_f} \right)^i E(D_{t+i} + U_{t+i}) + B_t$$

missä P_t on sijoituskohteen hinta osingon irtoamisen jälkeen, r_f on riskitön korko, D_t on osinko tai muu sijoituskohteesta saatava tuotto, U_t kuvaa näkymättömiä fundamentteja sijoituskohteessa ja B_t on hintakuplakomponentti. Fundamentaalin arvo voidaan laskea kaavalla $P_t^f = P_t - B_t$. Hintakuplakomponentti täyttää submartingalin ehdon:

$$(13) \quad E(B_{t+1}) = (1 + r_f)B_t,$$

missä hintakuplan odotettu arvo seuraavalla periodilla kasvaa riskittömän koron verran. Kun hintakuplaa ei ole $B_t = 0$ ja aikasarjan epästationaarisuutta kaavassa (12) kontrolloi ainoastaan muuttujat D_t ja U_t . Tästä seuraa, että mikäli D_t on epästationaarinen $I(1)$ -prosessi ja U_t on joko $I(1)$ -prosessi tai stationaarinen $I(0)$ -prosessi, niin sijoituskohteen hinta on enintään yksikköjuuriprosessi. Toisaalta hintakuplan vallitessa, kun $B_t > 0$ sijoituskohteen hinnat ovat ”räjähdysmäisiä”. Tämän vuoksi, mikäli näkymättömät fundamentaalit ovat enintään $I(1)$ ja D_t on stationaarinen ensimmäisen differenssin jälkeen, ”räjähdysmäistä” käytöstä sijoituskohteen hintojen aikasarjassa voidaan pitää todisteena hintakuplien olemassaolosta.

Corbet ym. (2018) määrittävät kryptovaluuttojen hinnalle kaavan, joka perustuu kaavaan Phillips (2015) kaavaan (12):

$$(14) \quad P_t = \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{1}{1+r_f} \right)^i E(U_{t+i}) + B_t,$$

missä P_t kuvaa kryptovaluutan hintaa, r_f on riskitön korko, U_t kuvaa ei-havaittavissa olevaa fundamentaalia ’*unobservable fundamental*’ ja B_t on hintakuplaa kuvaava komponentti. Kaava (14) pätee hintakuplakomponenttiin, jolloin B_t :n ollessa nolla, hintakuplaa ei ole ja sijoituskohteen hinnan epästationaarisuus johtuu ei-havaittavissa olevasta fundamentaalista.

”Räjähdysmäinen” prosessi aikasarjassa, kuvaa hyvin taloudellisten muuttujien radikaalia käyttäytymistä hintakuplan kasvamisvaiheessa, josta on esimerkkinä 1920-luvun Saksassa vallinnut hyperinflaatio. Aikasarjassa oleva ’*Mildly explosive*’-prosessi kuvaa taas maltillisempaa räjähdysmäistä käytöstä. Vaikka ei-havaittavissa oleva fundamentaali

saa aikaan hintakuplan syntymisen eli räjähdysmäisen käytöksen aikasarjassa, ensimmäinen osoitus hintakuplasta ja markkinoiden ylikuumentumisesta näkyy kohteen hinnassa, jota testaamalla voidaankin löytää todistusaineistoa hintakuplasta. (Phillips ja Magdalinos 2007, 2 ja Corbet ym. 2018.)

Cheung, Roca ja Su (2015) tutkivat kryptovaluutoissa ilmeneviä kuplia aikasarja-analyysillä ja havaitsevat Bitcoin/USD kurssissa hintakuplan merkkejä oikeahäntäisen yksikköjuuritestin avulla. Kryptovaluuttojen fundamentaalisen arvon yksiselitteinen määrittely ei nykytiedolla ole mahdollista, jonka vuoksi tutkimuksessa on käytössä itseään toistava ja rullaava, oikeahäntäinen yksikköjuuritestin, jolla pyritään havaitsemaan aikasarjan ominaisuuksia, jotka paljastavat hintakuplan sijoituskohteessa. GSADF-menetelmä on todettu robustiksi ja tehokkaasti tavaksi havaita useita peräkkäisiä hintakuplia aikasarjoissa. Testi havaitsee stokastista räjähdysmäistä käytöstä aikasarjassa, joiden on havaittu ilmenevän aikasarjoissa hintakuplien aikana. (Cheung ym. 2015.)

4.2 Yksikköjuuritestit hintakuplien havaitsemisessa

4.2.1 *Epästationaariset prosessit*

Yksikköjuuritesteillä tutkitaan aikasarjojen stationaarisuutta, jolla tarkoitetaan sitä, että aikasarjan eri ajankohtina mitatut keskiarvot ja varianssit pysyvät samoina. Epästationaarisen aikasarjan mallintaminen ja ennustaminen on haastavaa, joten aikasarja pyritään usein muuttamaan stationaariseksi. (Palma 2016, kpl 2, 1.4.) Epästationaarisuus voi esimerkiksi aiheuttaa muuttujien välisiä riippuvuuksia regressioanalyysissä, vaikka sellaisia ei olisi. Etenkin taloudelliset aikasarjat ovat usein epästationaarisia trendi- ja kausiominaisuuden vuoksi ja, jotta aikasarjaa voitaisiin analysoida, on siitä usein hyödyllistä muodostaa tilastollinen malli. Stokastisella prosessilla tarkoitetaan tilastollista tapahtumaan, joka vaihtelee yli ajan satunnaisesti. Esimerkkinä stokastisesta prosessista on Brownin liike eli Wienerin prosessi. Perinteinen autoregressiivinen AR(1) -malli, jossa selitetään Y_t :tä, on muotoa:

$$(15) \quad y_t = \rho y_{t-1} + \varepsilon_t, \quad t = 1, 2, \dots,$$

missä $Y_0 = 0$, ρ on reaalin numero ja ε_t on virhetermi, jonka keskiarvo μ on 0 ja varianssia merkitään sigmaalla σ^2 . Virhetermin arvot ovat normaalisti, riippumattomasti ja identtisesti jakautuneita. Kun ajankohta t lähestyy ääretöntä ja ρ :n itseisarvo $|\rho| < 1$ aikasarja muuttuu stationaariseksi aikasarjaksi. Jos ρ :n itseisarvo $|\rho| = 1$, aikasarja ei ole

stationaarinen. Kun $\rho = 1$, prosessia kutsutaan usein satunnaiskulukseksi. Jos $|\rho| > 1$ aikasarja on epästationaarinen ja aikasarjan varianssi kasvaa eksponentiaalisesti t :n kasvaessa. (Dickey & Fuller 1979 ja Dickey & Fuller 1976, 387.) Rationaaliset spekulatiiviset hintakuplat voivat käyttäytymiseltään muistuttaa ajassa muuttuvaa epästationaarista ja räjähdysmäistä prosessia, jolloin $|\rho| > 1$.

Aikasarjaa sanotaan heikosti stationaariseksi, jos odotusarvo μ on sama kaikille eri ajankohdille t . Toisena ehtona on, että kovarianssimatriisi $(X_{t1}, X_{t2}, \dots, X_{tn})$ on sama kuin kovarianssimatriisi $(X_{t1+h}, X_{t2+h}, \dots, X_{tn+h})$, jolloin muuttujan kovarianssi on ajasta riippumaton ja riippuu ainoastaan mielivaltaisesta kokonaisluvusta ”h”. Heikkoa stationaarisuutta kutsutaan myös kovarianssistationaarisuudeksi. Vahvasti stationaariselle aikasarjalle jakauma on sama kaikille satunnaismuuttujille X_t . (Fuller 1976, 3–4.) Heikko stationaarisuus on riittävä ehtona aikasarjan luotettavalle parametrien estimoinnille. (Metes, 2005, 1.)

Kuten aiemmin todettiin monet todelliset aikasarjat ovat usein epästationaarisia. Fuller (1976, 387) esittää kirjassaan ei-stationaaristen aikasarjojen perusmalleja. Yleensä aikasarjan tekee epästationaariseksi se, että keskiarvo tai varianssi ei ole vakio vaan muuttuu yli ajan. Hän esittää traditionaalisen mallin epästationaariselle taloudelliselle aikasarjalle:

$$(16) \quad Y_t = T_t + S_t + Z_t,$$

missä T_t on trendikomponentti, S_t on kausivaihtelutekijä ja Z_t on satunnaista vaihtelua kuvaava tekijä. Differentiaaleja käytetään usein, kun halutaan muuttaa aikasarja epästationaarisesta stationaariseksi, sillä differentiaalit poistavat epästationaarisuutta, joka liittyy trendiin (Fuller 1976, 413). Esimerkiksi AR(1) aikasarjan y_t ensimmäinen differenssi on määritelty kaavalla: $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$ (Fuller 1996, 41).

Useimmat aikasarjat sisältävät joko deterministisen tai stokastisen trenditekijän, jolloin näiden ominaisuuksien havaitsemisen on tärkeää mallin estimoinnin kannalta. Yksikköjuuritestien avulla on mahdollista päätellä minkälaisia trenditekijöitä aikasarja sisältää. Deterministinen termi aikasarjassa, tarkoittaa sitä, että aikasarjan tulevat arvot voidaan ennustaa ei-satunnaisen ajan funktion avulla ja kehitys on satunnaisista shokeista huolimatta ennakoitavissa. Aikaisemmat arvot eivät vaikuta deterministiseen trendiin. Stokastinen trendi aikasarjassa yhdistää aikasarjan lähtöarvon ja virhetermin, joka saa aikaan pysyvän muutoksen aikasarjan tulevaan kehitykseen. (Metes, 2005, 1–2.)

4.2.2 Dickey-Fullerin ja laajennettu Dickey-Fullerin -testi

Dickey-Fullerin testi on yleisesti käytetty yksikköjuuritestistä, joka soveltuu aikasarjalle, joka noudattaa AR(1) prosessia. Testissä estimoidaan muuttujaa $1 - \phi$ pienimmän neliösumman menetelmän avulla. Dickey Fullerin testissä nollahypoteesi $H_0: |\phi| = 1$ eli yksikköjuuri ja vastahypoteesi $H_1: |\phi| < 1$ eli stationaarinen aikasarja. Testi voidaan esittää muodossa:

$$(17) \quad \Delta y_t = (1 - \phi)y_{t-1} + \varepsilon_t,$$

missä $(1 - \phi)$ voidaan merkitä δ ja nollahypoteesi on yksikköjuuri $H_0: \delta = 0$, jolloin aikasarja on epästationaarinen ($I(1)$) ja integroitunut asteella yksi ja vastahypoteesi on muotoa $H_1: \delta < 0$, jolloin aikasarja on stationaarinen ($I(0)$). (Fuller 1979.)

Dickey-Fullerin yksikköjuuritestillä on kolme eri mallia, joille testi voidaan suorittaa (Metes 2005, 7, Brooks 2002, 355–356):

$$a) \quad \Delta y_t = \delta y_{t-1} + \varepsilon_t \quad \text{Ei vakiota, ei trendiä (Random walk)}$$

$$b) \quad \Delta y_t = c + \delta y_{t-1} + \varepsilon_t \quad \text{Vakio (Random walk with drift)}$$

$$c) \quad \Delta y_t = c + dt + \delta y_{t-1} + \varepsilon_t \quad \text{Vakio ja trendi (Trend stationary)}$$

Testi suoritetaan jollekin näistä regressiomalleista riippuen analysoitavan datan tilastollisista ominaisuuksista. Regressiomalli, johon sisältyy vakio ottaa huomioon aikasarjassa esiintyvän stokastisen trendin, joka voidaan poistaa differenssin avulla. Trendin sisältävä malli on stationaarinen, kun otetaan huomioon lineaarinen trendi aikasarjassa. Mallissa sanotaan oleva determinististä trendiä. Oikean mallin valinta on tärkeää, sillä se vaikuttaa sekä testituloksiin että kriittisiin arvoihin.

DF-testi perustuu nollahypoteesin t -testiin.

$$(18) \quad \hat{t} = \frac{\hat{\phi} - 1}{s.e.(\hat{\phi})},$$

jossa $s.e.$ tarkoittaa deltan keskivirhettä. Regressiossa käytetään pienimmän neliösumman menetelmää (OLS), jonka avulla estimoidaan kertoimet t -testiin. Tuloksena saatava testisuure noudattaa niin kutsuttua Dickey-Fullerin t -jakaumaa, joka on siirtynyt vasemmalle verrattuna perinteiseen t -jakaumaan tai normaalijakaumaan. (Brooks 2002, 362 ja Fuller 1976, 373.)

Laajennettu Dickey-Fullerin testi soveltuu AR(p) jakaumalle, jolloin mallissa voi olla enemmän kuin yksi viivetermi. AR(p) on silloin muotoa:

$$(19) \quad X_t = \phi_1 X_{t-1} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t$$

ADF-testissä eli laajennetussa Dickey-Fullerin testissä regressio on muotoa:

$$(20) \quad \Delta y_t = (\phi - 1)y_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \phi_i \Delta y_{t-i} + \varepsilon_t,$$

missä malli ottaa huomioon viivästyneet differenssitermit. Termiä $(1 - \phi)$ voidaan merkitä δ , jolloin nollahypoteesi mallissa on yksikköjuuri $H_0: |\delta| = 1$, ja vastahypoteesi eli stationaarinen aikasarja $H_1: |\delta| < 1$. Laajennettu DF-testi ottaa huomioon aikasarjassa esiintyvän autokorrelaation. (Brooks 2002, 361–363.)

4.2.3 Oikeahäntäinen yksikköjuuritestit

White (1958) oli ensimmäisiä, joka käsitteli tutkimuksissaan ‘*explosive*’-aikasarjan jakaumaa, jossa $|\delta| > 1$, jolloin AR(1)-prosessi on ”räjähdysmäinen”. Tämä tarkoittaa, että aikasarja on epästationaarinen ja sarjaan vaikuttavat shokit vahvistuvat ajan myötä. Oikeahäntäiset yksikköjuuritestit ovat kiinnostuksen kohteena, kun testataan ‘*explosive*’- ja ‘*mildly explosive*’-prosessia aikasarjassa ja soveltuu tämän vuoksi hintakuplien tarkasteluun. (Phillips ym. 2014.) Oikeahäntäisistä yksikköjuuritesteistä on käytetty useita hypoteesivaihtoehtoja.

Phillips ym. (2014) käyttivät nollahypoteesina kuplatesteissään:

$$(21) \quad H_0: y_t = y_{t-1} + \varepsilon_t,$$

missä $\varepsilon_t \sim (0, \sigma^2)$, Δy keskiarvo on 0 ja determinististä trendiä ei ole. Tämän mallin vastahypoteesina on Phillipsin (2014) mukaan ‘*explosive process*’, missä $\delta > 1$:

$$(22) \quad H_1: y_t = \delta y_{t-1} + \varepsilon_t.$$

Diba ja Grossman (1988a) käyttivät tutkimuksessaan nollahypoteesia, joka hyväksyi satunnaiskulun lisäksi mallin, jossa oli satunnaiskulku ja vakiotermin. Jos $\alpha \neq 0$ aikasarjaan liittyy stokastista trendiä.

$$(23) \quad H_0: y_t = \alpha + y_{t-1} + \varepsilon_t$$

Vastahypoteesi, $\delta > 1$, tässä mallissa sisältää myös vakiotermin α . (Phillips 2014):

$$(24) \quad H_1: y_t = \alpha + \delta y_t + \varepsilon_t.$$

Nämä kaksi aiempaa mallia voidaan sovittaa yhteen, jolloin Phillipsin ym. (2014) mukaan saadaan malli, jossa on heikko vakiotermi ja vastahypoteesi niin kutsuttu *'mildly explosive process'*:

$$(25) \quad H_0: y_t = \alpha T^{-\eta} + y_{t-1} + \varepsilon_t,$$

$$H_1: y_t = \alpha + \gamma t + \delta y_{t-1} + \varepsilon_t,$$

missä $\eta \geq 0$. Mallissa on deterministinen trenditekijä $\alpha T^{-\eta}$, jonka suuruus riippuu otoskoosta T ja parametrissa η . Nollahypoteesi mallissa on yksikköjuuri eli $\delta = 1$ ja vastahypoteesi ”räjähdysmäinen” prosessi $\delta > 1$. Kun η lähestyy ääretöntä, malli lähestyy kaavan (21) esitystä ja kun η lähestyy nollaa, malli lähestyy kaavan (23) esitystä ja kun $\eta = 1/2$ standardoitu tulos $T^{-1/2}y_t$ käyttäytyy asympotoottisesti kuten Brownin liike trendillä, joka soveltuu hyvin mallintamaan monia makrotaloudellisia ja rahoituksen aikasarjoja.

Phillips ym. (2014) mukaisesti ADF-testin regressio on oikeahäntäisessä yksikköjuuritestissä:

$$(26) \quad y_t = \alpha + \delta y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \phi_i \Delta y_{t-i} + \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim (0, \sigma^2),$$

missä nollahypoteesi $H_0: \delta = 0$ on yksikköjuuri ja vastahypoteesi $H_1: \delta > 0$ on *'mildly explosive autoregressive coefficient'* eli hintakuplan merkki. Regressioyhtälössä y_t on aikasarjan arvo eri ajankohtina, α on vakiotermi, p on viivetermien lukumäärä ja ϕ_t merkaa viiveoperaattoreiden differenssejä.

Pienimmän neliösumman menetelmällä saadaan estimaatit ja ADF-testin tulos:

$$(27) \quad ADF_{r_1}^{r_2} = \frac{\hat{\delta}_{r_1, r_2}}{s.e.(\hat{\delta}_{r_1, r_2})}$$

missä r_1 merkitsee testin aloituspistettä ja r_2 testin päätepistettä. Perinteisessä ADF-testissä $r_1 = 0$ ja $r_2 = 1$. (Pavlidis ym. 2016.)

RTADF *'right tailed ADF'*-testi on oikeahäntäinen versio perinteisestä ADF-testistä ja siinä testi suoritetaan koko aikasarja-aineistolle, jolloin alkupiste ja loppupiste ovat vakiot ensimmäisestä havainnosta viimeiseen havaintoon. Testi eroaa perinteisestä ADF-testistä nollahypoteesin kriittisten arvojen osalta, sillä RTADF-testissä saadun testisuureen arvon tulee olla pienempi kuin kriittinen arvo, jotta nollahypoteesi voidaan hyväksyä. Oikeahäntäisessä ADF-testissä mielenkiinto on erityisesti vastahypoteesissa, eikä

yksikköjuuressa, kuten perinteisen ADF-testin kohdalla. Kiinnostus on hinnan poikkeamissa fundamentaalisista arvoista, sekä hinnoitteluvirheissä, joita vastahypoteesi eli ”räjähdysmäinen” prosessi voi paljastaa. (Phillips ym. 2015.)

4.2.4 Asymptoottinen ja äärellinen jakauma

Ekonometriassa nojataan asymptoottiseen teoriaan, jossa tulokset pitävät teoriassa paikkansa ainoastaan, jos havaintoja on ääretön määrä. Todellisuudessa ääretöntä määrää havaintoja ei ole mahdollista saavuttaa ja asymptoottisen teorian oletuksia voidaan käyttää äärellisillä määrillä havaintoja. Tämä tarkoittaa, että arvio jonkin testisuureen asymptoottisesta käyttäytymisestä voidaan tehdä äärellisiä havaintoja hyödyntäen, kunhan havaintojen lukumäärä on tarpeeksi suuri. (Brooks 2002, 150.)

Oikeahäntäisille ja perinteisille yksikköjuuritesteille voidaan laskea asymptoottiset jakaumat, jotka riippuvat nollahypoteesin määrittelystä ja regressiomallista, jota käytetään. (Phillips ym. 2014.) Perinteisen ADF-testin jakauma jos nollahypoteesi on yksikköjuuri, voidaan määritellä kaavalla:

$$(28) \quad ADF_0^1 = \frac{\int_0^1 W(r)dW(r)}{(\int_0^1 W(r)^2 dr)^{\frac{1}{2}}},$$

missä W tarkoittaa Wienerin prosessia eli Brownin liike. ADF-testissä aikasarjasta laskettua t -testin tulosta (kaava 27) verrataan oikeahäntäiseen kriittiseen arvoon, joka katsotaan asymptoottisesta jakaumasta. Kun ADF-testin tulos ylittää kriittisen arvon nollahypoteesi yksikköjuuresta hylätään, joka viittaa räjähdysmäiseen prosessiin aikasarjassa

Jos testinä käytetään puolestaan SADF-testiä, jossa testiä toistetaan alkupisteen ollessa kiinteä ($r_1 = 0$) ja loppupistettä kasvaessa on asymptoottinen jakauma muotoa. (Pavlidis ym. 2016.):

$$(29) \quad \sup_{r_2 \in [r_0, 1]} \frac{\int_0^{r_2} W(r)dW(r)}{(\int_0^{r_2} W(r)^2 dr)^{\frac{1}{2}}}.$$

Phillips ym. (2015) osoittavat, että GSADF-testin, jossa testiä toistetaan sekä alkupistettä, että loppupistettä muuttaen ja, missä regressiomalli sisältää vakion, tuloksen asymptoottinen jakauma muotoa:

$$(30) \quad \sup_{r_2 \in [r_0, 1], r_1 \in [0, r_2 - r_0]} \left\{ \frac{\frac{1}{2} r_w [W(r_2)^2 - W(r_1)^2 - r_w] - \int_{r_1}^{r_2} W(r) dr [W(r_2) - W(r_1)]}{r_w^{1/2} \left\{ r_w \int_{r_1}^{r_2} W(r)^2 dr - \left[\int_{r_1}^{r_2} W(r) dr \right]^2 \right\}^{1/2}} \right\}.$$

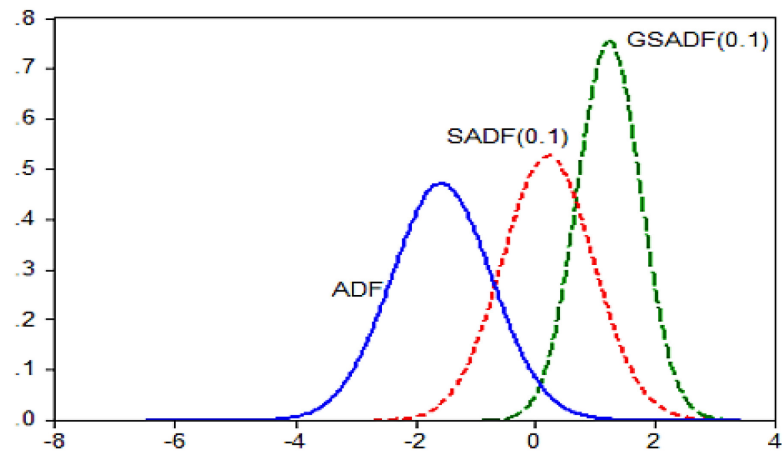
Asymptoottista jakaumaa tarvitaan, jotta voidaan verrata aikasarjaan tehdyn GSADF-testin tuloksia asymptoottisen jakauman avulla saatuihin kriittisiin arvoihin ja päättää hylätäänkö nollahypoteesi.

Äärellisen otoksen '*finite sample*' kriittiset arvot saadaan Monte Carlo -simulaatioiden avulla, kun määritellään viiveiden määrä k ja otoskoko T ja simuloidaan muuttujan δ arvoja ja lasketaan t-testin arvojen jakauma esimerkiksi 2000 regression toiston kautta. Kaavan 16) α ja η asetetaan testissä ykkösiksi. (Phillips ym. 2015.)

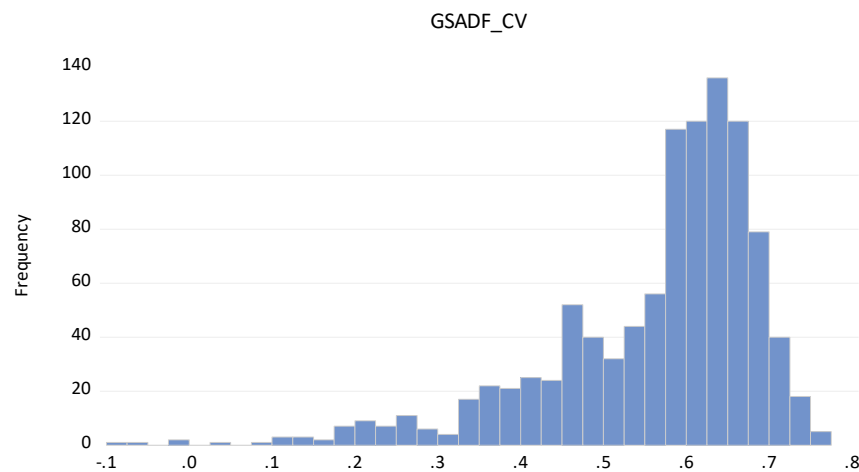
Monte Carlo -simulaation avulla pyritään löytämään mallien tilastollinen käyttäytymisen luomalla satunnaisia toistoja regressiosta ja laskemalla parametrien arvoille todennäköisyysjakauma. Monte Carlo -simulaatio laskee ADF-testiä satunnaisilla parametrien arvoilla ja yhtä suurelle otokselle, kuin mitä vertailuaineistossa. Tuloksena on satunnaisia polkuja aikasarjalle y_t , jotka ovat yhtä suuria kuin aineisto. Otoksista arvioidaan parametri ρ , joka on nollahypoteesin kohde, sekä t-testin arvot käyttäen PNS-menetelmää. Toistetaan tätä esimerkiksi 10 000 kertaa, jolloin saadaan jakauma t-arvoista. Jakaumasta voidaan katsoa kriittiset arvot esimerkiksi 90%, 95% tai 99% merkitsevyystasoisille. (Mooney 1997, 2–4.)

Phillips ym. (2015) tutkivat ADF-, SADF- ja GSADF-testien kriittisten arvojen jakaumia eri otoskooilla ja ikkunakooilla. He huomaavat, että pienimmän ikkunakoon r_0 pienentyessä, kriittiset arvot testeille kasvavat erityisesti asymptoottisen jakauman $N(0,1)$ -kohdalla. Finite samplen eli jakauman, jossa havaintojen määrä on rajattu T :hen, kohdalla kriittiset arvot eivät muutu yhtä radikaalisti.

Kuviossa 4 näkyy, miten asymptoottisten jakaumien $N(0,1)$ kriittisten arvojen jakaumat käyttäytyvät eri testeillä kun $r_0 = 0,1$. GSADF-testin kriittiset arvot ovat selvästi ADF- ja SADF-testiä korkeampia ja kriittisten arvojen jakaumat liikkuvat oikealle päin. (Phillips ym. 2015.)



Kuvio 4 Asymptoottiset jakaumat ADF-testit (Phillips ym. 2015)



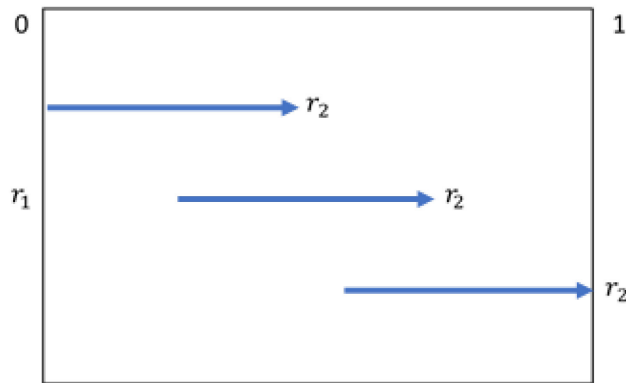
Kuvio 5 GSADF kriittiset arvot

Kuviossa 5 näkyy GSADF-testin kriittiset arvot äärelliselle otokselle, jossa T on 1096 ja arvot on estimoitu Monte Carlo -simulaation avulla. Kuten kuvassa näkyy, jakauma on oikealle painottunut, kuten asymptoottisessa jakaumassa. Jakauma on myös normaalijakaumaa huipukkaampi.

4.2.5 Rullaavat ja itseään toistavat yksikköjuuritestit

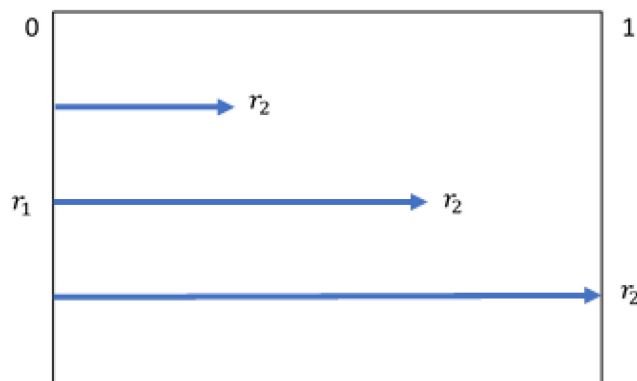
RADF- tai 'rolling ADF'-testi tehdään aikasarjaan useaan otteeseen rullaten aikaikkunaa eteenpäin. Aikaikkunan koko pidetään kuitenkin testissä vakiona. Kuviossa 6 havainnol-

listetaan perinteisen ADF-testin rullaavaa versiota, jossa alkupiste r_1 ja loppupiste r_2 liikkuvat yhden havainnon eteenpäin testin toistaessa itseään. (Caspi 2013, 5.) Kuviossa 6 on yksinkertaisuuden vuoksi valittu otoksen alkupisteeksi 0 ja loppupisteeksi 1, jolloin otos on normalisoitu otoskoolla T.



Kuvio 6 Rullaava ADF-testi (Caspi 2013, 5)

SADF- eli '*sup ADF*'-testi on ADF-testi, jossa regressio kohdistetaan tiettyyn otokseen eli aikaikkunaan koko aikasarjasta. Pienin aikaikkuna r_0 on pienin mahdollinen aikaikkuna, jossa on tarpeeksi havaintoja ja tästä aloitetaan rekursiivinen prosessi, jossa aikaikkunaa kasvatetaan aina koko aikasarjan laajuuteen asti. Ikkunakoko r_w kasvaa siis suuremmaksi jokaisella kerralla ja lähtöarvo $r_1 = 0$ on kiinteä. Jokainen ikkuna on laajuudeltaan pisteestä r_1 pisteeseen r_2 ja r_2 kasvaa arvoltaan. Aikaikkunaa voidaan merkitä $r_w = r_2$. Kuviossa 7. nähdään miten SADF-testi toistaa testiä kasvattaen otoskokoa aina yhden havainnon kerrallaan, kunnes koko aineisto on testattu.



Kuvio 7 Sup ADF -testi (Phillips ym. 2015)

Regressiomalli 'sup ADF'-testille voidaan esittää muodossa:

$$(31) \quad y_t = \alpha + \delta y_{t-1} + \sum_{i=1}^k \phi \Delta y_{t-1} + \varepsilon_t,$$

missä T on havaintojen määrä koko aikasarjassa ja $t = 1, 2, \dots, T$ ja viiveiden määrää merkitään k :lla. Nollahypoteesi on $\delta = 1$ ja vastahypoteesi on $\delta > 1$. ADF-testiä merkitään tällöin (Phillips ym. 2011 ja Phillips ym. 2015.):

$$(32) \quad SADF(r_0) = \sup_{r_2 \in [r_0, 1]} ADF_0^{r_2}.$$

Hintakuplien havaitseminen tilastollisin menetelmin on haastavampaa, jos aikasarjassa on useita hintakuplia verrattuna tilanteeseen, jossa hintakuplia on vain yksi. Vaikeus piilee mallien epälineaarisesta rakenteesta ja katkoksissa, joita kuplat aiheuttavat aikasarjadataan ja seurauksena voi olla tulosten vääristyminen. Tämän vuoksi on tärkeää kehittää uusia malleja, jotka kuvaavat paremmin talouden ilmiöitä. (Phillips ym. 2015.) SADF-testin rajoitteena on se, että alkupiste on kiinteä ja aina aikasarjan ensimmäinen havainto. Jos aikasarjassa on useita hintakuplia, voi jälkimmäinen kupla jäädä havaitsematta, mikäli ensimmäinen hintakupla on dominoiva. (Bettendorf, Chen 2013.) Myös Phillipsin ym. (2013) mukaan, mikäli aikasarjadata sisältää useita jaksoja nousuja ja laskuja, voi SADF voi olla epäjohdonmukainen ja epäonnistua kuplien havaitsemisessa. Ongelmia voi syntyä erityisesti silloin, kun aikasarjadataa on pitkältä ajanjaksolta ja muutokset ovat nopeita. Ratkaisuksi tähän on ehdotettu uutta GSADF, 'Generalized sup ADF'-testiä.

GSADF-testi käyttää samaa rekursiivista oikeahäntäistä yksikköjuuritestiä kuin SADF, mutta mallissa aloituskohta aikaikkunalle ei ole kiinteä, vaan testi tehdään toistamalla ja muuttamalla sekä ensimmäistä havaintoa r_1 että viimeistä havaintoa r_2 . GSADF kattaa näin suuremman määrän otoksia koko aikasarjasta ja aikaikkuna on joustavampi, jolloin useiden kuplien esiintyminen havaitaan tehokkaammin kuin SADF -testillä. (Phillips ym. 2015.)

GSADF-testissä käytetään rullaavan aikaikkunan menetelmää, jossa lähtöarvona on r_1 koko aikasarjasta T ja loppuarvo on r_2 ja $r_2 = r_1 + r_w$. Kaavassa r_w on aikaikkunan koko regressiossa. Aikaikkunaa voidaan merkitä $r_w = r_2 - r_1$.

erityisesti, mikäli jokin tietty havainto $\tau = [T_r]$ osoittaa hintakuplan merkkejä. Jotta voitaisiin minimoida aikasarjadatasta hintakuplien aiheuttamat laskuperiodit, tehdään ADF-testi lopusta alkuun päin. Tätä menetelmää voidaan käyttää varoitusjärjestelmänä hintakuplia tutkiessa. (Cheung ym. 2015.) Itseään toistavien ja rullaavien ADF-testien perusteella voidaan arvioida päivä, jolloin aikasarja muuttuu satunnaiskulusta ”räjähdysmäiseksi” prosessiksi.

Taaksepäin tehtävä sup ADF -testi tarkoittaa sitä, että lähtöarvo testissä on r_2 eli viimeinen arvo ja testi suoritetaan rekursiivisesti kasvattamalla aikaikkunaa taaksepäin aina ensimmäiseen havaintoon asti.



Kuvio 9 Backward sup ADF -testi (Phillips ym. 2015)

Kuten kuviossa 9 nähdään, että viimeinen havainto r_2 , josta testi aloitetaan, on kiinteä ja otosta kasvatetaan toistaen taaksepäin. Testi voidaan ilmaista myös kaavalla:

$$(35) \quad BSADF_{r_2}(r_0) = \sup_{r_1 \in [0, r_2 - r_0]} ADF_{r_1}^{r_2}.$$

Phillips ym. (2015) mukaan prosessin räjähdysmäisyyttä voidaan merkata alkavaksi ensimmäiseksi havaintoarvoksi, jonka SADF-arvo ylittää taaksepäin lasketun sup ADF kriittisen arvon, joka on saatu Monte Carlo -simulaation avulla.

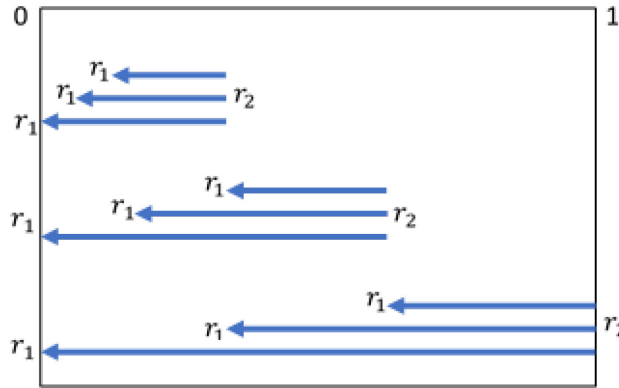
Uusin hintakuplan aikamerkitsemisstrategia perustuu GSADF-testiin, missä ADF-testiä toistetaan aineistossa sekä lähtöarvoa että loppuarvoa muuttamalla. Phillips ym. (2015) mukaan hintakuplan alkamisajankohtaa voidaan tällöin merkata T_{r_e} ja se on kronologisesti tarkasteltuna ensimmäinen observaatio, jonka GSADF arvo ylittää Monte Carlo simulaation kautta äärelliselle otokselle lasketun kriittisen arvon tietyllä merkitsevyystasolla. Kuplan päättymisajankohtaa voidaan merkitä T_{r_f} , joka on kronologisesti seuraava arvo T_{r_e} :n jälkeen, jossa aikasarjan GSADF-arvo alittaa kriittisen arvon. Hintakuplan alku- ja loppuajankohtaa voidaan merkitä siis:

$$(36) \quad \hat{r}_e = \inf_{r_2 \in [r_0, 1]} \left\{ r_2 : BSADF_{r_2}(r_0) > scv_{r_2}^{\beta T_{r_2}} \right\}$$

$$\hat{r}_f = \inf_{r_2 \in [r_e, 1]} \{r_2 : BSADF_{r_2}(r_0) < scv_{r_2}^{\beta T r_2}\},$$

missä $scv_{r_2}^{\beta T r_2}$ on $100(1 - \beta_T)\%$ merkitsevyystasolla SADF-testin kriittinen arvo 'sup critical value', joka perustuu otoskoko T . Empiriassa β_T asetetaan usein 0,05 tasolle, jolloin merkitsevyystaso on 95%. $BSADF(r_0)$, jossa $r_2 \in [r_0, 1]$ ja r_0 on pienin valittava aikaikkuna, on taaksepäin tehtävä sup ADF-testi (Kuvio 10), joka liittyy GSADF arvoon seuraavasti:

$$(37) \quad GSADF(r_0) = \sup_{r_2 \in [r_0, 1]} \{BSADF_{r_2}(r_0)\}.$$



Kuvio 10 Backward GSADF (Phillips ym 2015)

BSADF-testi havaitsee tehokkaasti hintakuplan merkkejä aikasarjassa ja aikamerkitsee ne, jolloin testiä voidaan käyttää reaaliaikaisesti hintakuplien havaitsemiseen. Phillips ym. (2011) ehdottavat, että hintakuplan keston tulisi olla suurempi kuin $\log(T)$, missä T on otoskoko. Tämän ehdon vallitessa $T\hat{r}_e + \log(T)$ observaation jälkeen ensimmäinen observaatio, joka alittaa kriittisen arvon on T_{r_f} eli hintakuplan päättymisajankohta. Hintakuplan päättymisajankohtan merkintä BSADF-testin kohdalla muuttuu hieman:

$$(38) \quad \hat{r}_f = \inf_{r_2 \in [r_e + \delta \log(T)/T, 1]} \{r_2 : BSADF_{r_2}(r_0) < scv_{r_2}^{\beta T r_2}\}.$$

Kaavassa muuttuu ainoastaan alkupisteen r_e merkintä, johon lisätään $\frac{\delta \log(T)}{T}$, jotta hintakuplan keston täytyy ylittää $\log(T)$, jotta se voidaan hyväksyä. Ehdon lisääminen poistaa liian lyhyet hintakuplaperiodit, jotka eivät ole tutkimuksen kannalta relevantteja.

5 EMPIIRINEN TUTKIMUS

5.1 Tavoitteet

Tutkielman empiirisessä osuudessa tutkitaan kolmen markkina-arvoltaan suuren kryptovaluutan aikasarjadatasta ilmeneviä hintakuplia tilastollisin menetelmin. Tutkielmassa tarkastellaan Bitcoinin, Litecoinin ja Ethereumin aikasarjoja, sillä ne ovat markkina-osuuksiltaan suuria kryptovaluuttoja, joista löytyy myös dataa tarpeeksi pitkältä ajalta. Tutkielmassa on pyritty käyttämään mahdollisimman tuoretta aikasarjadataa ja mukana myös vuosi 2018, josta ei kryptovaluuttojen osalta ole vielä empiiristä tutkimusta. Vertailun vuoksi tutkielmassa tarkastellaan myös dollarin euro -kurssin aikasarjadataa ja siinä mahdollisesti esiintyviä hintakuplia.

Cheung ym. (2015) tutkivat Bitcoinin hintakuplia Phillips-Shi-Yu (2013) mukaan GSADF-menetelmällä Mt. Gox pörssin hinnoissa. Tutkielmassa käytetään samoja menetelmiä, kuin kyseisessä tutkimuksessa, sillä mallit (esim. Taipalus, 2012) joissa osinkotai vuokratuloista laskettua nykyarvoa eli fundamentaalista arvoa on verrattu hintaan, eivät sellaisenaan sovellu kryptovaluuttojen tarkasteluun. Molemmissa tutkimuksissa on kuitenkin käytetty yksikköjuuritestejä hintakuplien ennakointiin, joten menetelmissä on samankaltaisuuksia. GSADF-menetelmä havaitsee hintakuplia aikasarjan ekonometristen ominaisuuksien kautta ja testin on havaittu olevan robusti havaitsemaan hintakuplia aikasarjoissa ex-ante, joten se sopii erityisesti aikaiseksi varoitusjärjestelmäksi hintakuplien seurantaan.

Corbet ym. (2018) tutkivat GSADF-menetelmällä hintakuplia Bitcoinin ja Ethereumin aikasarjadatasta ja käyttivät hintakuplien merkitsemiseen BSADF-menetelmää. Tutkimukseen ei kuitenkaan sisälly vuoden 2017 loppupuolta tai vuotta 2018, jotka ovat hintojen muutosten kannalta erityisen mielenkiintoisia. Vertailevaa tutkimusta, jossa otetaan kryptovaluuttojen rinnalle tarkasteluun aito valuutta, ei ole tehty.

Dollarin punta -kurssia ovat tutkineet aiemmin Bettendorf ja Chen (2013) ja he käyttivät myös Phillips-Shi-Yu -menetelmää havaitakseen kuplia aikasarjadatasta. He tarkastelevat myös fundamentaalisia tekijöitä, jotka ovat vaikuttaneet hintakuplien taustalla ja huomaavat, että kurssissa oleva hintakupla johtuu fundamentaalien räjähdysmäisestä käytöksestä eikä spekulatiivisesta hintakuplasta. Dollarin eurokurssin tarkastelua GSADF-menetelmällä ei löytynyt aiemmista tutkimuksista.

Tutkielmassani tarkastelen oikea häntäisten yksikköjuuritestien aikasarjan stationaarisuutta ADF-testillä ja tutkin onko hinnoissa havaittavissa kuplia. Nollahypoteesina: Aikasarjalla on yksikköjuuri, ei-stationaarinen aikasarja. Vastahypoteesi: Aikasarjalla ei ole yksikköjuurta eli kyseessä on *'mildly explosive process'*, jolloin aikasarjassa esiintyy hintakuplan merkkejä.

5.2 Data ja menetelmä

Tutkielman data kerätään coinmarketcap.com-sivustolta ja tilastollisessa analyysissä käytetään päivän diskreettejä sulkemishintoja aikasarjadataa. Kryptovaluuttojen hintatiedot ovat näkyvissä päiväkohtaisesti ja historiallisesti coinmarketcap.com-sivustolla, jossa ne on laskettu volyymilla painotettuna keskiarvona eri kryptovaluuttatarjoajien hinnoista. Esimerkiksi Bitcoinin markkinatarjoajia on sivustolla otettu huomioon 400, joten voidaan olettaa, että laskettu hinta kuvastaa hyvin Bitcoinin keskihintaa. Sivustolla markkinatarjoajista on poistettu ne, joilla kauppaa voi käydä ilman kuluja, sillä niiden kautta on mahdollista vääristää volyymia käyttämällä erilaisia sijoitusrobotteja. Kryptovaluuttojen hinnat on muutettu päiväkohtaisen USD/EUR-kurssin mukaisesti euromääräisiksi. Aikasarjadata on päiväkohtaista dataa aikaväliltä 1.9.2015–21.8.2018, ja havaintoja on 1096 jokaista eri valuuttaa kohden. Bitcoinin kohdalla tarkastellaan vertailevana aineistona myös pidempää päivittäistä aikasarjaa vuosilta 2013–2018, johon sisältyy 1952 havaintoa.

Kryptovaluuttoja vaihdetaan vuorokauden ympäri, myös viikonloppuisin, joten päiväkohtainen kurssi muutettu dollareista euroiksi, viikonlopun osalta, perjantain kurssin mukaan. Nimellinen dollarin eurokurssin on kerätty Datastreamistä.

GSADF-testin kriittisten arvojen laskemiseen aineistosta käytetään Monte Carlo -simulaatiota, joka toistetaan 2000 kertaa. Empiriassa Bitcoinin, Ethereumin, Litecoinin ja USD/EUR-kurssin aikasarjoissa on 1096 havaintoa ja pienin aikaikkuna r_0 on 71 havaintoa, joka tarkoittaa $(1096 - 71) \times 2000 = 2\,050\,000$ regressiota. Bitcoinin pidemmän aikavälin aikasarjadata sisältää 1952 observaatiota ja pienin aikaikkuna $r_0 = 99$, joka tarkoittaa simulaatiossa $3\,706\,000$ regressiota. Testin tekeminen on tietokonetehollisesti todella vaativaa ja aikaa vievää. (Caspi 2017, 11.) Tutkielmassa esitetään GSADF-menetelmän tulokset ja kriittiset arvot ja rajana nollahypoteesin hylkäämiselle on 95 prosentin merkitsevyystaso.

GSADF-testissä on tärkeää, että pienin mahdollinen aikaikkuna r_0 on valittu oikein. Havaintojen kokonaislukumäärää kuvataan T :llä. Jos T on pieni, täytyy r_0 olla tarpeeksi suuri, jotta havaintoja on tarpeeksi ensimmäiseen estimaatioon. Jos T on suuri, täytyy r_0 olla tarpeeksi pieni, jotta ei ohiteta merkkejä hintakuplasta aikasarjadataan alkupäässä. Phillips ym. (2015) ehdottavatkin laajamittaisen simulaation tuloksena aikaikkunan valintaa kaavalla: $r_0 = 0,01 + 1,8/\sqrt{T}$. Tutkielman aineiston kohdalla $T = 1096$, jolloin pienin aikaikkuna on 71 havaintoa. Bitcoinin pidemmän aikavälin 2013–2018 kohdalla $T = 1952$, jolloin pienin aikaikkuna on 99 havaintoa.

Viiveoperaattorin k valinta on tärkeää testin kannalta. Phillips ym. (2015) suosittelevat kiinteän viiveoperaattorin käyttöä GSADF-testissä. Heidän mukaansa BIC 'Bayesian information criterion' toimii SADF-testin kohdalla, mutta GSADF-testissä testitulokset ovat ylisuuria. Heidän mukaansa peräkkäisten hypoteesien testaaminen voi johtaa koon vääristymiseen ja samalla vähentää SADF- ja GSADF-testien tehoa. Tutkimus osoittaa,

että SADF- ja GSADF-testien koko pysyy kontrolloituna, kun käytetään kiinteää viivettä $k = 1$ tai $k = 0$ rekursiivisessa testissä. Viiveen jättäminen pois poistaa kokonaan 'size distortion'-ongelman. Tämän vuoksi tähän tutkielmaan on valittu kiinteä viive 0 kaikkiin testeihin. GSADF-testi on myös tietokonetehollisesti vaativa, joten testin kasvattaminen hidastaa testin läpimenoaikaa merkittävästi.

Oikean regressiomallin valinta on tärkeää oikeahäntäisen yksikköjuuritestin kannalta. Diba ja Grossman (1988a) käyttävät tutkimuksessaan regressiomallia, jossa on otettu huomioon sekä vakio-termi että trendi. Kun taas Phillips ym. (2014) käyttävät tutkimuksessaan regressiomallia, joka sisältää ainoastaan vakio-termin. Phillips ym. (2014) mukaan oikeahäntäisille yksikköjuuritesteille, joiden vastahypoteesi on "räjähdysmäinen" prosessi $\delta > 1$, on empiirisesti epärealistista sisällyttää regressiomalliin vakio ja trendi. Realistisin malli räjähdysmäiselle käytökselle taloudellisessa aikasarjassa on regressiomalli, johon ei sisälly kumpaakaan vakiota tai trendiä. Kuitenkin tämä tarkoittaa, että yksikköjuuren tapauksessa $\delta = 1$ malli ei hyväksy determinististä trendiä aikasarjaan. Tämä tarkoittaa, että aikasarjan keskiarvon poikkeamat nolasta voivat johtaa testissä nollahypoteesin hylkäämiseen ja 'mildly explosive'-prosessin hyväksymiseen. Vakion sisältävä regressiomalli on heidän mukaan empiirisesti kuitenkin realistisempi kuin vakion ja trendin sisältämä malli.

Phillips ym. (2014) tutkimusta seuraten tässä tutkielmassa käytetään GSADF-testissä ja Monte Carlo -simulaatiossa kaava (26) mukaista regressiomallia, jossa otetaan huomioon vakio, mutta ei trendiä.

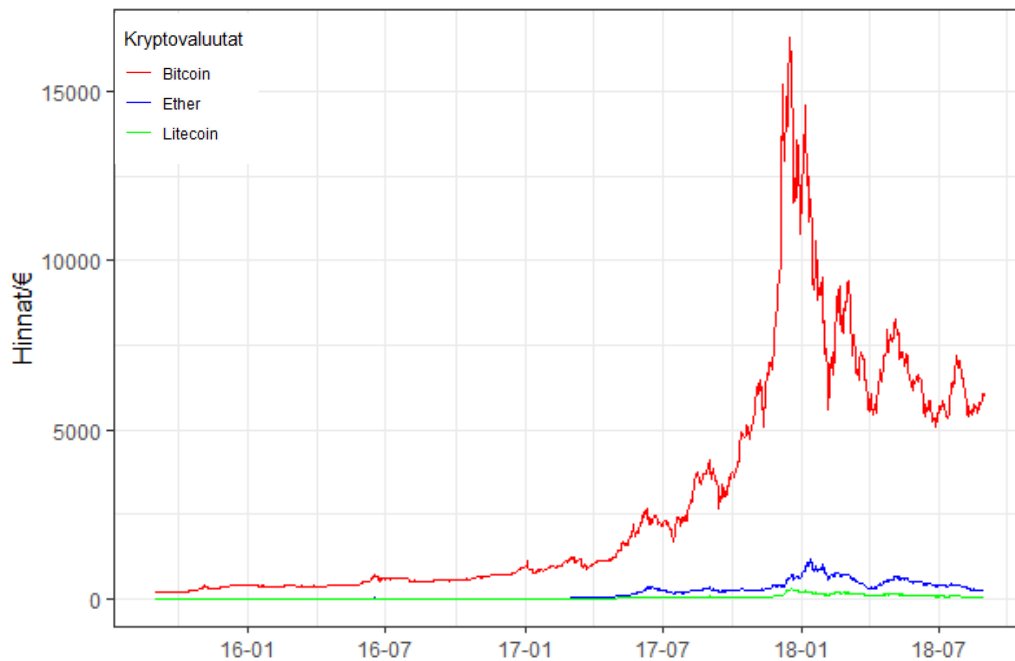
5.3 Datan kuvailu

5.3.1 Kryptovaluutat ja USD/EUR-kurssi

Kuviossa 11 nähdään kryptovaluuttojen hintojen kehitys aikavälillä 2015–2018, josta näkee, että Bitcoin on selvästi arvoltaan suurin ja se on ollut sitä koko tarkasteluajanjakson ajan. Kuvasta voi havaita myös aikasarjojen välistä korrelaatiota Bitcoinin ja Ethereumin välillä, etenkin vuodenvaihteessa 2017–2018, jolloin hinnat ovat olleet nousussa ja lähteneet jyrkkään laskuun tämän jälkeen. Litecoinin absoluuttinen hinta on tarkasteluajanjaksona alhaisin ja on selvää, että vertaileva kuvio kryptovaluuttojen välillä ei kuvaa hyvin suhteellisia hinnan muutoksia periodilla.

Suurimmat hinnan muutokset voidaan havaita Bitcoinin hinnassa, joka on tarkasteluajanjaksolla 2015–2018 käynyt korkeimmillaan 16 571,67 eurossa ja ollut alhaisimmillaan 202,62 euroa, joka tarkoittaa 98 prosentin hinnan nousua ajanjaksolla. Absoluuttisten hintojen perusteella voidaan aikasarjadatasta havaita myös eksponentiaalista trendiä, joka

on etenkin Bitcoinin kohdalla ollut nouseva alkuvuoteen 2018 asti ja lähtenyt sen jälkeen laskuun. Graafin perusteella myöskään keskiarvo ei ole ajasta riippumaton vaan muuttuu ajassa. Myös Ethereumin ja Litecoinin kohdalla on havaittavissa nousevaa trendiä. Aikasarjoissa ei ole havaittavissa kausivaihtelua.

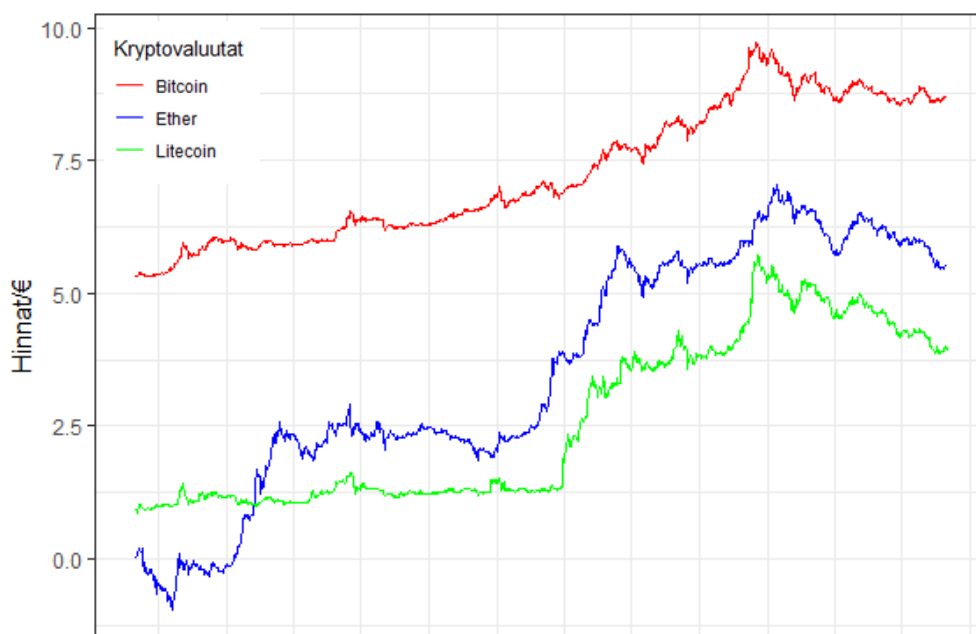


Kuvio 11 Kryptovaluuttojen hinnat 2015–2018

Tarkasteltaessa ajanjaksoa 2017–2018, etenkin Bitcoinin hinta on viimeisen vuoden aikana noussut ja laskenut useaan kertaan ja hinnanmuutokset ovat olleet radikaaleja. Absoluuttisia hintoja tarkasteltaessa eri kryptovaluuttojen vertailu ei kuitenkaan ole mielekästä, sillä lähtöhinnat ovat Bitcoinissa, Ethereumissa ja Litecoinissa hyvin erisuuruiset. Bitcoinin lähtöhinta 1.9.2015 on ollu 202,62 euroa, Ethereumin 1,04 euroa ja Litecoinin 2,50 euroa. Ethereum on ohittanut Litecoinin arvon ensimmäistä kertaa 8.2.2016, jonka jälkeen hinta on jatkanut nousua edelleen, jättäen Litecoinin taakseen. Vaihdamman määrä on Bitcoinin kohdalla kasvanut merkittävästi ajanjaksolla, sen ollessa tunnetuin kryptovaluutta markkinoilla, mikä osaltaan vaikuttaa hinnan radikaaleihin muutoksiin.

Tarkastelemalla aikasarjadatasta muodostettuja histogrammeja, on selvää, etteivät muuttujat ole normaalijakautuneita. Normaaliuden ja vinouden parantamiseksi ja trendivaikutuksen minimoimiseksi aikasarjadatasta otetaan luonnollinen logaritmi. Logaritmoinnin avulla saadaan hintojen lähtötason huomioon ottavat suhteelliset muutokset,

jotka ovat tutkielman kannalta oleellisempia kuin absoluuttiset hinnat. Kuviossa 12 nähdään kryptovaluuttojen hinnan kehitys 2015–2018 logaritimuunnoksen jälkeen.



Kuvio 12 Kryptovaluuttojen logaritmiset hinnat

Logaritmin jälkeen aikasarjoja tarkasteltaessa voidaan havaita Ethereumin alempi lähtöarvo, sillä Ethereum lanseerattiin elokuussa 2015. Ethereum on kuitenkin alle vuodessa ohittanut Litecoinin, jonka kehitys on ollut pitkään melko tasaista. Selvää nousevaa trendiä on havaittavissa edelleen logaritimuunnoksen jälkeen erityisesti 2017–2018 aikana. Logaritimuunnoksen jälkeen myös eri kryptovaluuttojen suhteellisten hintojen välinen korrelaatio on ilmeinen graafia tarkasteltaessa. Bitcoinissa, Ethereumissa ja Litecoininissa on kaikissa havaittavissa selkeä nousu- ja laskuperiodi 2018 alussa, jolloin kryptovaluutoissa on usein arvioitu olleen hintakupla.

Euro otettiin EU-maiden sisäiseen käyttöön ensimmäisen kerran vuonna 1999 ja käteiskäyttöön vuonna 2002. Dollarin eurokurssi lähti nousuun heti Euron käteiskäyttöön ottamisen jälkeen ja nousi vuoden 2002 arvosta 0,83\$/1€ kaikkien aikojen huippuunsa heinäkuuhun 2007, jolloin kurssi oli 1,58\$/1€. Tästä eteenpäin Dollari on vahvistunut Euroon nähden erityisesti 2008 finanssikriisin aikana ja sitä seuranneen euroalueen talouskriisin aikana. (Beckmann ym. 2018.) Tutkielmaan mukaan otetulla ajanjaksolla 2015–2018 kurssi on vaihdellut 0,80\$/1€ ja 0,96\$/1€ välillä, joten aikasarjassa ole vaihtelu on ollut lievempää kuin esimerkiksi finanssikriisin aikaan.

Kuviossa 13 näkyy USD/EUR-kurssin vaihtelu ajanjaksolta 2015–2018.



Kuvio 13 USD/EUR kurssi

Dollarin eurokurssin hinnan kehityksessä ei näy juurikaan trendiä ennen vuotta 2017, jonka jälkeen trendi näyttää olevan laskeva ja satunnainen vaihtelu jatkuu kevään 2018 aikana. Tammikuun 2017 ja tammikuun 2018 välillä on havaittavissa selkeä laskuperiodi. Aikasarjan käytös näyttää kuitenkin melko satunnaiselta.

5.3.2 Kuvailevat tunnusluvut

Kuvailevat tunnusluvut on otettu luonnollisen logaritmin jälkeen, jota taulukossa 1 merkitään hintasarjana. Suurin keskihajonta kryptovaluuttojen hintasarjoissa näyttää olevan Ethereumilla, kun otetaan suhteelliset hinnan muutokset huomioon. Yllättäen suhteellisia hinnan muutoksia tarkasteltaessa Bitcoinin keskihajonta on kaikkein alhaisin.

Vinousluvun avulla tarkastellaan datan symmetrisyyttä, jolloin täysin symmetrisen datan esimerkiksi normaalijakautuneen aikasarjan vinous saa arvon nolla. Normaalijakautuman huipukkuus on kolme. (Hae-Young 2013.) Taulukossa 1 voidaan havaita, että kaikkien aikasarjojen vinous on melko lähellä nollaa, jolloin ne jakautuvat lähes symmetrisesti.

Taulukko 1 Kryptovaluuttojen ja USD/EUR-kurssin kuvailevat tunnusluvut

	Hintasarjat				Tuottosarjat			
	Bitcoin	Ether	Litecoin	USD/EUR	Bitcoin	Ether	Litecoin	USD/EUR
Havainnot	1096	1096	1096	1096	1095	1095	1095	1095
Mediaani	6,905	2,822	1,441	-0,052	0,000	0,000	0,000	0,000
Keskiarvo	7,258	3,586	2,598	-0,054	0,000	0,005	0,003	0,000
Keskihajonta	1,253	2,261	1,564	0,020	0,005	0,068	0,059	0,004
Minimi	5,311	-0,959	0,863	-0,097	-0,030	-0,323	-0,391	-0,026
Maksimi	9,715	7,047	5,715	-0,016	0,027	0,290	0,512	0,023
Vinous	0,241	-0,220	0,394	-0,242	-0,312	0,169	1,395	-0,098
Huipukkuus	1,608	1,779	1,466	2,199	7,245	6,604	16,056	7,177

Positiiviset vinousarvot Bitcoinin ja Litecoinin hintasarjoissa viittaavat datan painottumiseen oikealle jakaumassa. Ethereumin hintasarjan negatiivinen huipukkuus viittaa datan painottumiseen jakauman vasemmalle puolelle. Voidaan päätellä, että Bitcoinin ja Litecoinin kohdalla hinnat ovat positiivisesti painottuneet, joka viittaa positiivisiin hintoihin, kun taas Ethereumin kohdalla painotus on negatiivinen eli hinnat ovat negatiivisesti painottuneet. Huipukkuus on alhaisempi kuin normaalijakaumassa kaikille aikasarjoille. Huipukkuus on kaikissa positiivista, mikä tarkoittaa paksuhäntäisyyttä datassa. Kuo Chen ym. (2018) mukaan monilla kryptovaluutoilla vinousarvot ovat positiivisia. Tämä viittaa tuottojen nopeaan nousuun ja hitaaseen laskuun ja luo sijoittajille hyviä vaihtoehtoisia sijoituskohteita hajauttamaan sijoitusportfoliota.

USD/EUR-kurssin hintasarjan tunnusluvut nähdään myös taulukossa 1. Hintasarjan perusteella nähdään, että aikasarja ei poikkea merkittävästi normaalijakaumasta, sillä sen huipukkuus on 2,2 (normaalijakauma 3) ja vinous -0,24 (normaalijakauma 0). Keskihajonta aikavälillä on 0,02, mikä on todella alhainen verrattuna esimerkiksi kryptovaluuttojen vastaaviin arvoihin aikaväliltä.

Kun tarkastellaan tuottosarjoja, muuttuvat tulokset hieman. Etherin ja Litecoinin tuottosarjat osoittavat maltillista keskimääräistä positiivista tuottoa aikaväliltä. Suurin keskihajonta on Etherin tuottosarjassa ja alhaisin USD/EUR-kurssissa. Tuottoja tarkasteltaessa negatiivinen vinousarvo Bitcoinin ja USD/EUR-kurssissa viittaa tuottojen negatiiviseen painottumiseen. Litecoinin tuottosarjan vinousarvo on voimakkaasti positiivinen, jolloin voidaan todeta tuottojen vahva positiivinen painottuminen aikavälillä. Huipukkuus nousee yli normaalijakauman kaikissa aikasarjoissa, mutta erityisesti Litecoinilla huipukkuus on voimakasta.

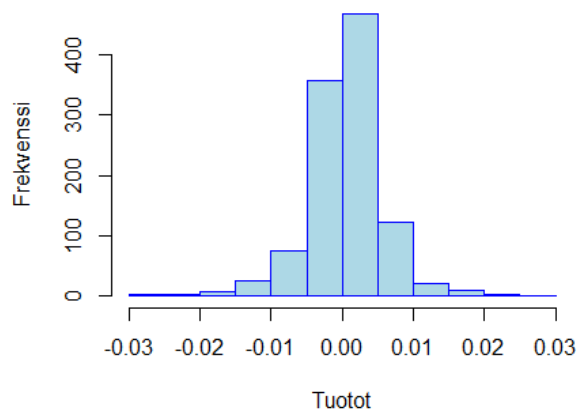
Jakaumien tarkempaan tilastolliseen tarkasteluun kryptovaluuttojen ja USD/EUR-kurssin aikasarjat on muutettu jatkuva-aikaisiksi tuotoiksi differenssin avulla. Jatkuva-

aikaisia tuottoja käytetään usein tilastollisessa analyysissä, sillä ne eivät ole autokorreloituja, kuten absoluuttiset hinnat. Jatkuva-aikainen tuotto on laskettu kaavalla (Brooks 2002, 7–8.):

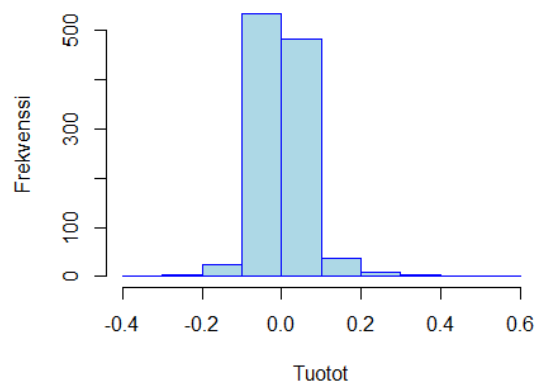
$$(39) \quad \ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right) = \ln(P_t) - \ln(P_{t-1}).$$

Aikasarjoista lasketut jatkuva-aikaiset tuotot auttavat vertailemaan eri aikasarjojen jakaumia. Kuvioissa 14–17 on esitetty Bitcoinin, Litecoinin, Ethereumin ja USD/EUR-kurssin jatkuva-aikaisten tuottojen jakaumat.

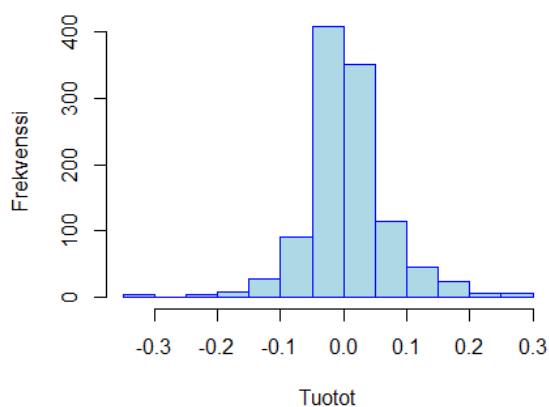
Kryptovaluuttojen ja USD/EUR-kurssin jatkuva-aikaisten tuottojen normaalijakautuneisuutta tarkastellaan Shapiro-Wilk-testillä, joka osoittaa, että aikasarjat eivät ole normaalisti jakautuneita. Tarkastellaan kuitenkin tämän lisäksi myös histogrammeja, jolloin saadaan käsitys aikasarjojen ääriarvojen jakautumisesta ja voidaan vertailla eri aikasarjoja keskenään.



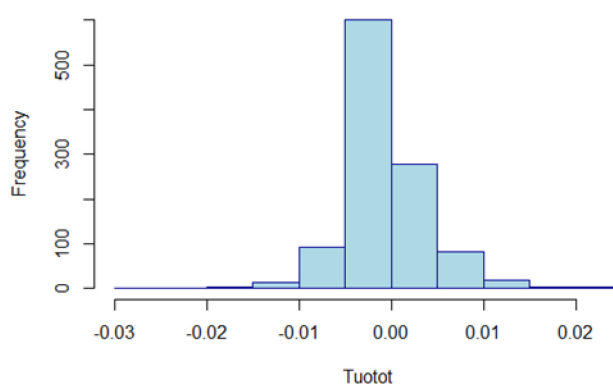
Kuvio 14 Bitcoin tuottosarjan jakauma



Kuvio 15 Litecoin tuottosarjan jakauma



Kuvio 16 Ethereum tuottosarjan jakauma

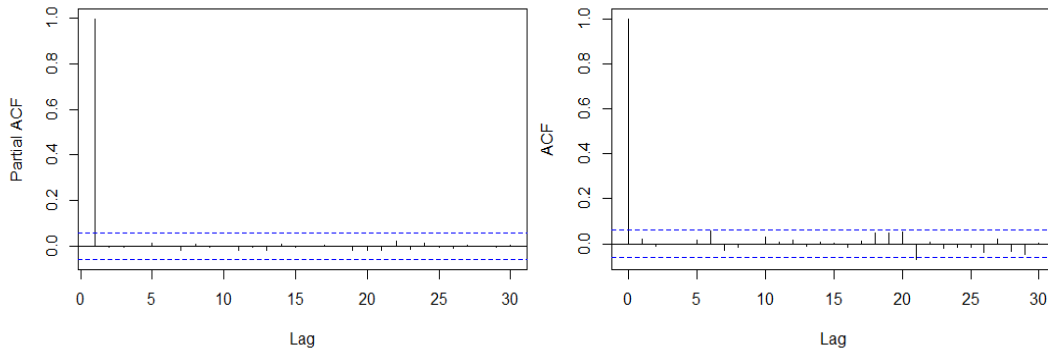


Kuvio 17 USD/EUR-kurssi tuottosarjan jakauma

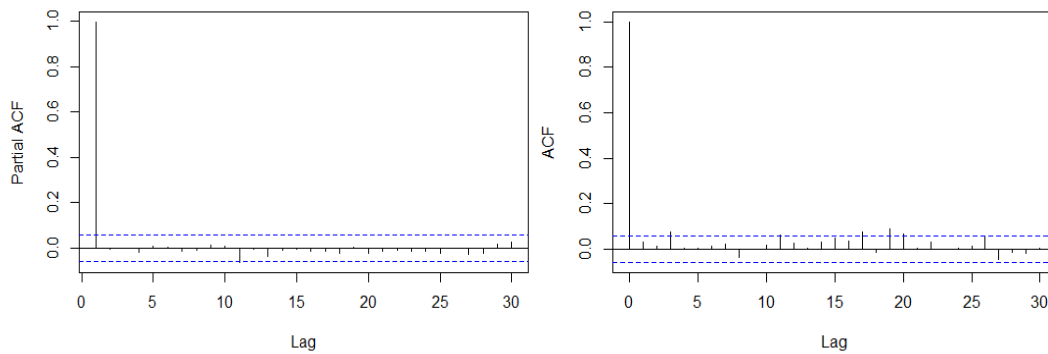
Histogrammeista kuvioissa 14–17 nähdään, että differenssimuunnoksesta huolimatta mikään jakaumista ei ole täysin normaali ja jokaisessa aikasarjassa on havaittavissa viinoutta. Litecoinin aikasarjassa tuotot ovat kaikkein eniten keskittyneet nolla ympärille ja poikkeavia arvoja on vähemmän kuin Ethereumin ja Bitcoinin aikasarjoissa. Jakaumista havaitaan myös Ethereumin painottuminen vasemmalle ja Bitcoinin ja Litecoinin painottuminen oikealle. USD/EUR-kurssin kohdalla huomataan, että havainnot ovat jakauman vasemmalle puolelle painottuneet eli negatiiviset arvot painottuvat selkeästi tarkasteluajanjaksolla.

Seuraavaksi tarkastellaan aikasarjoissa esiintyvää autokorrelaatiota. Autokorrelaatiofunktio '*autocorrelation function*' on standardoitu mittari kahden havainnon y_t ja y_{t+h} väliselle riippuvuudelle aikasarja-aineistossa. Stationaariselle aikasarjalle kovarianssi muuttujien välillä ei riipu ajasta vaan ainoastaan viivetermeistä. (Palma 2016, kpl 2.8.) Autokorrelaatio voi aiheuttaa regressiomalliin virheellisiä tuloksia, joten se on usein otettava huomioon tilastollisessa analyysissä. Autokorrelaatiota voidaan differenssin lisäksi huomioida lisäämällä viivetermien määrää regressiomallissa. Kuitenkin liian suuri määrä viivetermejä voi johtaa testin tehon laskemiseen. (Brooks 2002, 363.)

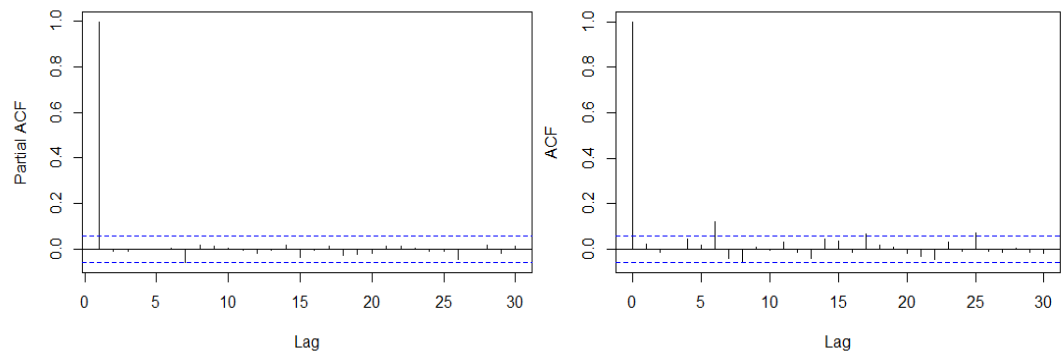
Aikasarjojen autokorrelaatiot ovat kaikilla lähes yksi, kun tarkastellaan hintasarjoja. Tästä voidaan päätellä, että aiemmat hinnat korreloivat vahvasti edeltävien kanssa. Kuvi-
oissa 18–21 esitetään hintasarjojen PACF eli osittaisautokorrelaatio sekä ACF ensimmäi-
sen differenssin jälkeen. Osittaisautokorrelaatio mittaa autokorrelaatiota aikasarjassa
poistaen aikaisempien havaintojen vaikutukset korrelaatioon. (Brooks 2002, 266.)



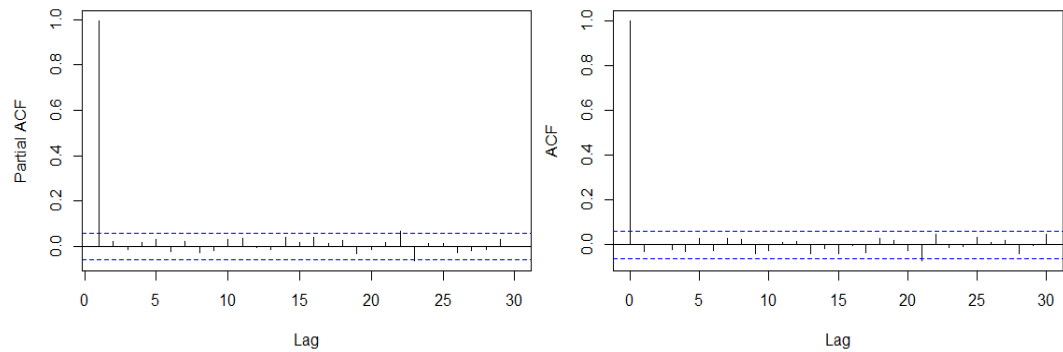
Kuvio 18 PACF hintasarjasta ja ACF tuottosarjasta (Bitcoin)



Kuvio 19 PACF hintasarjasta ja ACF tuottosarjasta (Ethereum)



Kuvio 21 PACF hintasarjalle ja ACF tuottosarjalle (Litecoin)



Kuvio 20 PACF hintasarjalle ja ACF tuottosarjalle (USD/EUR)

Osittaisautokorrelaatioita tarkasteltaessa huomataan Ethereumissa viiveessä 11, Litecoinissa viiveessä 7 ja USD/EUR-kurssissa viiveessä 21 ja 22. Bitcoinin aikasarjassa ei havaita osittaisautokorrelaatiota. Tuottosarjaa tarkasteltaessa aurokorrelaatiota on myös Bitcoinilla viiveen 21 kohdalla ja Ethereumin ja Litecoinin kohdalla autokorrelaatiota havaitaan useassa viiveessä.

Tarkastellaan vielä kryptovaluuttojen välistä yhteisvaihtelua. Korrelaation laskennassa käytetään Pearsonin korrelaatiokerrointa, joka kuvaa muuttujien välistä lineaarista riippuvuutta ja sen suuntaa. Mitä suuremman arvon kerroin saa, sitä voimakkaampaa on muuttujien välinen yhteisvaihtelu. Pearsonin korrelaatiokerroin saa arvon väliltä -1 ja 1. Jos arvo on positiivinen vaihtelu on samansuuntaista ja jos se on negatiivinen muuttujat vaihtelevat vastakkaisiin suuntiin. Jos kerroin saa arvon 0 tarkoittaa se riippumattomuutta kahden muuttujan välillä.

Taulukossa 2 nähdään Bitcoinin, Ethereumin, Litecoinin ja USD/EUR-kurssin välinen korrelaatio, kovarianssi vastaavat p-arvot. Korrelaatio on laskettu kryptovaluuttojen jatkuva-aikaisista tuotoista. Havaitaan kaikissa kryptovaluutoissa melko vahvaa positiivista

korrelaatiota. Vahvin korrelaatio on testin mukaan Bitcoinin ja Litecoinin välillä, jossa se on 0,578. Tulokset ovat myös tilastollisesti merkitseviä, sillä p-arvo on kaikissa alle 0,05.

Taulukko 2 Korrelaatio kryptovaluutat ja USD/EUR

Korrelaatio on laskettu tuottosarjoille aikaväliltä 2015–2018. Tilastollinen merkitsevyys näkyy taulukossa eri merkitsevyystasoisille 99% (***), 95% (**) ja 90% (*).

Korrelaatio	Bitcoin	Ether	Litecoin	USD/EUR
Bitcoin	1,0000			
Ethereum	0,3500***	1,0000		
Litecoin	0,5780***	0,3545***	1,0000	
USD/EUR	0,0327	6,23E-05	0,0262	1,0000

Taulukossa 2 nähdään myös USD/EUR-kurssin ja kryptovaluuttojen väliset korrelaatiot. Korrelaatiot on laskettu aikasarjojen ensimmäisille differensseille eli jatkuva-aikaisille tuotoille. Taulukosta nähdään, että positiivista korrelaatiota on havaittavissa USD/EUR-kurssin ja kaikkien kryptovaluuttojen välillä, mutta minkään kryptovaluutan kohdalla tulos ei ole tilastollisesti merkitsevä, sillä p-arvo jää alle 0,05 eli 95% merkitsevyystason. Korrelaatiot ovat hyvin alhaisia, joten kryptovaluutat voitaisiin nähdä hyvänä sijoituskohteena portfolion suojauksessa. Kuo Chuen ym. (2018) havaitsevat kryptovaluuttojen ja perinteisten sijoituskohteiden välillä hyvin alhaisen korrelaation ja näkevät kryptovaluutoissa etua portfolion hajauttamisessa, sillä keskimääräiset tuotot ovat olleet korkeita.

5.3.3 Stationaarisuus

Kryptovaluuttojen log-hintoja tarkasteltaessa on havaittavissa selvä nouseva trendi ja hinnan vaihtelu ylös ja alas vuosien 2015–2018 välillä. Voidaan epäillä, että data on epästationaarista, sillä keskiarvo näyttää nousevan ajassa. Aikasarjoissa myös varianssi näyttää olevan ajasta riippuvainen ja olevan vahvimmillaan 2017–2018 aikavälillä. Tämä on myös merkki aikasarjan epästationaarisuudesta. USD/EUR-aikasarjassa on myös ajasta riippuvaa vaihtelua, joten voidaan epäillä aikasarjan epästationaarisuutta.

Kaikille aikasarjoille tehtiin ADF-testi aikasarjan stationaarisuuden selvittämiseksi. Taloudellisilla aikasarjoilla on usein havaittu ominaisuus, että aikasarja on epästationaarinen ja ensimmäisen differenssin jälkeen muuttuu stationaariseksi. Differenssistationaarista aikasarjaa $I(1)$ sanotaan myös integroitunut asteella yksi. Differenssin jälkeen aikasarja muuttuu stationaariseksi eli $I(0)$. (Campbell & Perron 1991, 5.)

Tehdään ADF-testi kaikille log-aikasarjoille eli hintasarjalle ja aikasarjojen 1. differensseille eli tuottosarjoille. Kun testitulos on kriittistä arvoa pienempi, voidaan aikasarjan sanoa olevan stationaarinen. Testauksessa viivetermin valintaan on käytetty AIC informaatiokriteeriä '*Akaike information criterion*', missä maksimi viivetermien määräksi on valittu 21. Aikasarjat on testattu ilman vakiota ja trendiä, vakion sisällyttäen, sekä trendin ja vakion sisällyttäen.

Taulukko 3 ADF-testi Bitcoin

Taulukossa ADF-testi on tehty ln-aikasarjalle, jota kutsutaan myös hintasarjaksi ja aikasarjalle, josta on otettu ensimmäinen differenssi eli tuottosarjalle. Nollahypoteesin hylkäämisen perusteena on merkitsevyystasot 99% (***), 95% (**) ja 90% (*), jotka on merkitty taulukkoon. Viiveet on valittu AIC-informaatiokriteerin mukaan. ADF-testi on tehty käyttäen regressiomallia, johon sisältyy vakio, vakio ja trendi tai ei kumpaakaan.

Bitcoin				Kriittiset arvot		
Vakio ja trendi	Viiveet	Hintasarja	Tuottosarja	1 %	5 %	10 %
-	0	2,3320	-32,1282***	-2,5671	-1,9411	-1,6165
Vakio	0	-1,0373	-32,2984***	-3,4361	-2,8640	-2,5681
Vakio ja trendi	0	-1,4261	-32,2955***	-3,9665	-3,4139	-3,1290

Taulukko 4 ADF-testi Ethereum

Taulukossa näkyy ADF-testin tulokset aikaisemman taulukon (3) mukaisesti. Ethereumin kohdalla AIC-informaatiokriteeri antoi eri viiveet hintasarjalle ja tuottosarjalle. Tuottosarjan kohdalla tulos on tilastollisesti merkitsevä 99% (***). merkitsevyystasolla.

Ethereum					Kriittiset arvot		
Vakio ja trendi	Viiveet	Hintasarja	Viiveet	Tuottosarja	1 %	5 %	10 %
-	3	1,0933	2	-17,2025***	-2,5671	-1,9411	-1,6165
Vakio	3	-1,3038	2	-17,3597***	-3,4361	-2,8640	-2,5681
Vakio ja trendi	3	-0,8353	2	-17,3955***	-3,9665	-3,4139	-3,1291

Taulukko 5 ADF-testi Litecoin

Taulukossa ADF-testin tulokset hintasarjalle ja tuottosarjalle viiveillä, jotka valittu AIC-informaatiokriteerin mukaan. Tuottosarjan kohdalla nollahypoteesi voidaan hylätä 99% (***). merkitsevyystasolla.

Litecoin					Kriittiset arvot		
Vakio ja trendi	Viiveet	Hintasarja	Viiveet	Tuottosarja	1 %	5 %	10 %
-	8	0,7806	7	-11,0828***	-2,5671	-1,9411	-1,6165

Vakio	8	-0,8017	7	-11,1755***	-3,4361	-2,8640	-2,5681
Vakio ja trendi	8	-1,4091	7	-11,1727***	-3,9665	-3,4140	-3,1291

Taulukko 6 ADF-testi USD/EUR

Kuten aikaisemmissa taulukoissa USD/EUR-kurssin kohdalla ADF-testi on tehty hintasarjalle ja tuottosarjalle erikseen ja viiveiden määrän valinnassa on käytetty AIC-informaatiokriteeriä. Tuottosarjan kohdalla nollahypoteesi voidaan hylätä 99% (***) merkitsevyystasolla.

USD/EUR				Kriittiset arvot		
Vakio ja trendi	Viiveet	Hintasarja	Tuottosarja	1 %	5 %	10 %
-	0	-0,3035	-34,06157***	-2,5671	-1,9411	-1,6165
Vakio	0	-1,5267	-34,04795***	-3,4361	-2,8640	-2,5681
Vakio ja trendi	0	-2,2121	-34,03384***	-3,9665	-3,4139	-3,1290

Taulukot 3–6 kuvaavat ADF-testin tuloksia Bitcoinin, Ethereumin, Litecoinin ja USD/EUR aikasarjoille. Ensimmäisestä testituloksesta nähdään, että aikasarjat ovat epästationaarisia, sillä testitulokset eivät ole alle kriittisten arvojen, nollahypoteesia ei voida hylätä. Taulukoissa näkyy testitulos ADF-testille 1. differenssin jälkeen ja huomataan, että kaikilla aikasarjoille tulos on merkitsevä 99 prosentin merkitsevyystasolla ja nollahypoteesi voidaan hylätä. Aikasarjat muuttuvat siis stationaarisiksi ensimmäisen differenssin jälkeen.

5.4 Bitcoin 2015–2018

5.4.1 Kriittiset arvot ja testitulokset

GSADF-testi tehdään Bitcoinin aikasarjaan aikavälillä 2015–2018, käyttäen kiinteää viivettä $k = 0$. Havaintoja aikavälillä oli yhteensä 1096. Bitcoinin aikasarjaan tehdyn GSADF-testin perusteella voidaan todeta hintakuplaan viittaavia merkkejä aikasarjassa. Taulukossa 7 nähdään testitulokset. Testitulos ylittää kriittiset arvot kaikilla merkitsevyystasoilla ja nollahypoteesin hylkäämiseen on vahvat perusteet. Testitulos on tilastollisesti merkitsevä. Tuloksen perusteella nollahypoteesi yksikköjuuresta voidaan hylätä, jolloin aikasarjaa kuvaa paremmin vastahypoteesi eli hintakuplaan viittaava *'mildly explosive process'*.

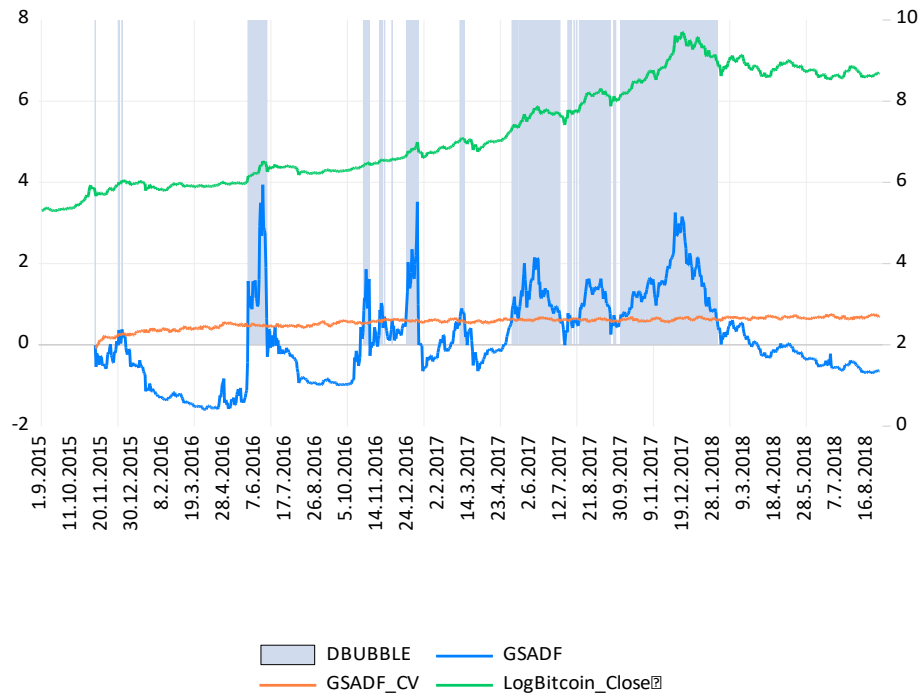
Taulukko 7 Testitulokset ja kriittiset arvot Bitcoin

	GSADF	SADF
Testitulos	3,941***	2,674***
99 %	2,924	2,062
95 %	2,362	1,593
90 %	2,123	1,273

SADF-testillä pyritään mittaamaan GSADF-testin tehoa ja varmistamaan saatu tulos. SADF-testin tulos ylittää myös kriittiset arvot kaikilla merkitsevyystasoilla. SADF-testi siis havaitsee myös räjähdysmäistä käytöstä aikasarjassa, joka viittaa hintakuplaan Bitcoinin aikasarjassa 2015–2018 aikavälillä.

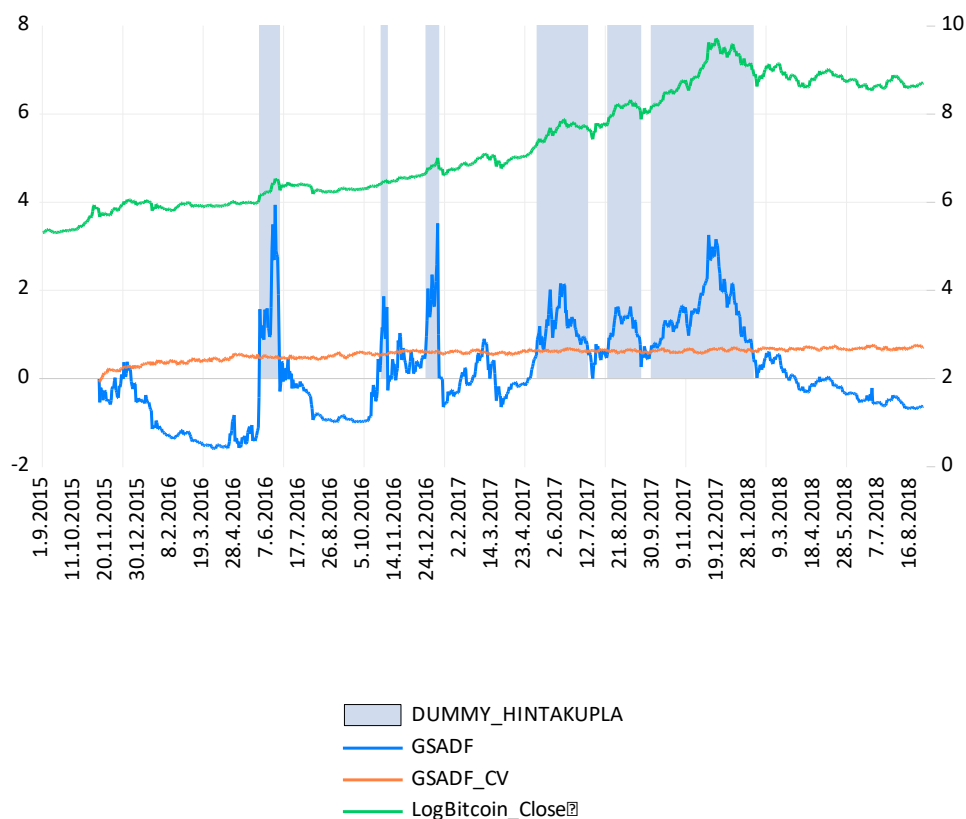
5.4.2 Aikamerkinnot

Hintakuplat Bitcoinin aikasarjassa 2015–2018 aikamerkittiin BSADF-testin avulla. Aikamerkintä löysi Bitcoinin 2015–2018 aikasarjasta useita hintakuplia ja tukee GSADF-testin tulosta. Kuviossa 22 nähdään BSADF-testin tulos ja kriittinen arvo eri ajanjaksoina ja voidaan nähdä, milloin testitulos on ylittänyt kriittisen arvon. Aikasarjassa on myös useita lyhyitä hintakuplia, jotka rajataan pois tarkemmasta tarkastelusta.



Kuvio 22 Bitcoin aikamerkintä BSADF 2015–2018

Bitcoinin aikamerkinnästä näkee, että BSADF-arvo on ylittänyt kriittisen arvon useasti tarkasteluajanjakson aikana. Viimeisin hintakuplan merkki on datassa vuodenvaihteen 2017–2018 aikana. Kun tarkastelusta poistetaan alle kuuden päivän hintakuplat, jää jäljelle seitsemän hintakuplaa ajanjaksolla 2015–2018, jotka näkyvät kuviossa 23.



Kuvio 23 Bitcoin aikamerkintä BSADF 2015–2018 (>6 päivää)

Aikamerkinnästä nähdään hintakuplien ajankohdat ja kestot, sekä vertailun vuoksi Bitcoinin logaritminen hinta vihreänä viivana, jonka avulla voidaan tarkastella suhteellisia hinnan muutoksia testin määrittämien hintakuplien aikana. Kuviosta nähdään, että testi on havainnut tehokkaasti ajanjaksoja, joissa hinta on aloittanut nousun ja myös hintakuplan päättymisajankohtia, jotka näkyvät myös graafissa ajoittuvan hyvin ennen hinnan notkahdusta. Täytyy kuitenkin vielä tarkastella muutosten taustalla olevia tekijöitä, jotta voidaan päätellä, onko kyseessä hintakupla vai perusteltu hinnanmuutos sijoituskohhteessa.

Taulukossa 8 on listattu kaikkien BSADF-testin merkitsemien yli kuuden päivän hintakuplien alkamis- ja päättymisajankohdat ja kestot. Yhteensä hintakuplia ajanjaksolla 2015–2018 testi havaitsee seitsemän. Testissä voidaankin havaita, että hintakuplat painottuvat Bitcoinin kohdalla erityisesti vuoteen 2017. Hintakuplien kestot vaihtelevat kahdeksasta päivästä useisiin kuukausiin. Seuraavaksi tarkastellaan testin havaitsemien hintakuplien taustalla olevia hinnan muutoksia ja tapahtumia.

Taulukko 8 Hintakuplat Bitcoin 2015–2018

Hintakuplat	Kesto/päiviä
28.05.2016– 21.06.2016	25
26.10.2016– 02.11.2016	8
21.12.2016– 05.01.2017	16
08.05.2017– 15.05.2017	8
17.05.2017– 09.07.2017	54
04.08.2017– 13.09.2017	41
27.09.2017– 31.01.2018	127

Ensimmäinen havaittu hintakupla ajoittui välille 28.5.2016–21.6.2016 ja kesti 25 päivää. Jo hintakuplan alkamispäivänä absoluuttinen hinnan nousu on ollut noin 12%, 425,33 eurosta 476,16 euroon, jonka jälkeen hinta on jatkanut vielä nousuaan saavuttaen maksimin 687,49 euron paikkeilla. Hintakuplan päättymisajankohdaksi testi havaitsee 21.6.2016, jolloin hinta 591,47. Hintakuplan taustalta ei löydy ajanjaksolta merkittäviä tapahtumia, jotka olisivat vaikuttaneet hintaan. Hinta vaihteli hintakuplan päättymisen jälkeen 500–600 euron välillä aina lokakuuhun asti.

GSADF-testi havaitsee toisen hintakuplan lokakuussa 2016. Kyseinen hintakupla kesti kuitenkin vain 8 päivää, jonka aikana hinta vaihteli alkamispäivän 621,30 eurosta, päättymispäivän 666,33 euroon. Hintakuplan puhkeamiseen voi viitata lähes 6,8 prosentin hinnan lasku 2.11.2016–3.11.2016 välisenä aikana, jonka BSADF-testi on merkinnyt hintakuplan päättymisajankohdaksi. Vuoden 2016 hinnan nousun takana on nähty Bitcoin lohkoketjun teknologinen kehittyminen ja sijoittajien kasvanut kiinnostus sijoituskohteesta esimerkiksi suojaustarkoituksessa, sekä erityisesti Kiinan Yuanin arvon laskeminen. (Li, Tao, Su, Lobont 2018.)

Vuoden vaihteessa 2016–2017 GSADF-testi on havainnut vähän yli kahden viikon mittaisen hintakuplan, jossa hinta on vaihdellut alkamispäivän hinnasta 799,65 euroa aina 1102,32 euroon. Ajankohta oli merkittävä, sillä Bitcoin ei ole ylittänyt 1000 euron rajaa 2013 romahduksen jälkeen ja hintojen ei uskottu nousevan entiselle tasolleen.

Seuraavan hintakuplan GSADF-testi havaitsi toukokuussa 2017, jolloin hintakuplan kesto oli vain kahdeksan päivää. Hinta jatkoi tämän jälkeen nousuaan ja testi havaitsi toisen hintakuplan heti kaksi päivää aikaisemman päättymisen jälkeen 17.5.2017. Hintakuplan alkamispäivän kurssi oli noin 1650 euroa ja korkeimmillaan hinta kävi yli 2600 eurossa ja hintakuplan päättymispäivän jälkeen asettui 2017 heinäkuussa 2083 euroon. Kyseistä periodia seurasi vielä yksi hintakupla 4.8.2017–13.9.2017 välisenä aikana. Kyseisellä ajanjaksolla hinta nousi noin 2464 eurosta yli 4000 euroon, joka tarkoittaa lähes 40 prosentin nousua vähän yli kuukauden mittaisella ajanjaksolla.

Elokuussa 2017 Bitcoin lohkoketjuun tehtiin *'hard fork'*, jossa lohkon kokoa haluttiin kasvattaa, nopeampien siirtojen mahdollistamiseksi ja Bitcoin lohkoketjun ohjelmointia muutettiin, jonka seurauksena haaraui uusi kryptovaluutta Bitcoin Cash. Hinnan nousu ennen *'hard fork'*-tapahtumaa on usein oletettavaa, sillä aikaisempaa kryptovaluuttaa

omistanut saa uutta valuuttaa saman verran, kun omistuksessa on alkuperäistä valuuttaa. (Becker 2018.) Tässä mielessä hinnan nousua voidaan pitää osittain fundamentaaleihin sidottuna, sillä todellisen omistuksen arvo kasvaa. Bitcoinin hinta oli nousujohteinen elokuuhun 2017 tullessa, mutta kurssi lähti vielä voimakkaampaan, eksponentiaaliseen nousuun syyskuusta eteenpäin, joka päättyi syyskuussa hintojen romahdukseen. Suurimpana syynä syyskuun hintakuplan romahdukseen on pidetty Kiinan sääntelyn vahvistumista. Kiinassa oli tätä ennen jo kielletty ICO:t ja suunnitteilla oli myös kryptovaluuttapörssien kieltäminen. (Li ym. 2018.)

Pisin hintakupla on aikavälillä 27.9.2017–31.1.2018, jolloin hintakuplan alkamis- ja päättymisajankohdan välillä on 127 päivää. Ajanjaksoa voidaan pitää kryptovaluuttojen kannalta merkityksellisenä, sillä yhtä suurta nousua ja laskua on nähty vain harvoissa sijoituskohteissa. Vuoden 2017 aikana kryptovaluutat olivat suuren spekuloinnin kohteena ja hintojen nousu houkutteli uusia sijoittajia kryptovaluuttamarkkinoille. Kryptovaluutoista maalattiin kuvaa uutena digitaalisena kultana ja teknologian hyödyt alkoivat kiinnostaa yrityksiä. Tätä seurasi alkuvuodesta 2018 tapahtunut hintojen romahdus, jota on kutsuttu nimellä *'the great crypto crash'*, jonka aikana markkinat menettivät yli 300 miljardia dollaria arvostaan. (Bloomberg 2018a.) Vuoden 2017 aikana useat suuret yritykset alkoivat hyväksymään Bitcoinia maksuvälineenä. EY oli ensimmäinen Big4 yhtiö, joka alkoi hyväksyä Bitcoinia maksuna palveluistaan. Perässä tuli mm. PwC, joka ilmoitti antavansa myös neuvontaa kryptovaluuttasijoituksista. (Becker 2018.) Tämä osaltaan vauhditti Bitcoinin kurssikehitystä, mutta ei yksinään selitä voimakasta hinnan nousua, joka nosti yhden Bitcoinin arvon yli 16 000 euroon.

Hintakuplan alkamispäivänä 27.9.2017 kurssi oli jo noussut 200 euroa edellisen päivän 3 307,99 eurosta ja nousu jatkui tästä eteenpäin voimakkaana. Kurssi on korkeimmillaan 16.12.2017, jolloin 16571,67 euroa, joka tarkoittaa 362,80 prosentin hinnan nousua alkamispäivän hinnasta. Helmikuun ensimmäinen päivä 2018, jolloin hintakuplan voidaan GSADF-testin perusteella sanoa olevan ohi, hinta romahti 7353,79 euroon, joka tarkoittaa yli 50 prosentin hinnan laskua huipulta. Tämän jälkeen kurssissa on ollut satunnaisia nousuja ja laskuja 5000–8000 euron paikkeilla koko vuoden 2018 ajan, eikä kurssi ole noussut joulukuun lukemiin tähän päivään mennessä.

Vuoden 2017 loppupuolella tulee markkinoille ensimmäiset Bitcoin futuurit, jotka laskevat liikkeelle CBOE *'Chicago Board Options Exchange'* ja CME *'Chicago Mercantile Exchange'*, joiden avulla tavalliset sijoittajat pystyvät shorttaamaan Bitcoinia. Futuurien tulo markkinoille joulukuussa on nähty yhtenä suurimmista syistä hintakuplan lopulliseen puhkeamiseen. (Becker 2018.) Huhut kryptovaluuttojen sääntelyn lisäämisestä, sekä tietomurto Coincheckiin, Japanin suurimpaan kryptovaluuttapörssiin olivat myös kuplan puhkeamisen taustalla. Coincheckin tietomurrossa katosi NEM tokeneita 400 miljoonan dollarin edestä. (Bloomberg.com 2018b.) Viimeisimmän Bitcoin hintakuplan kohdalla

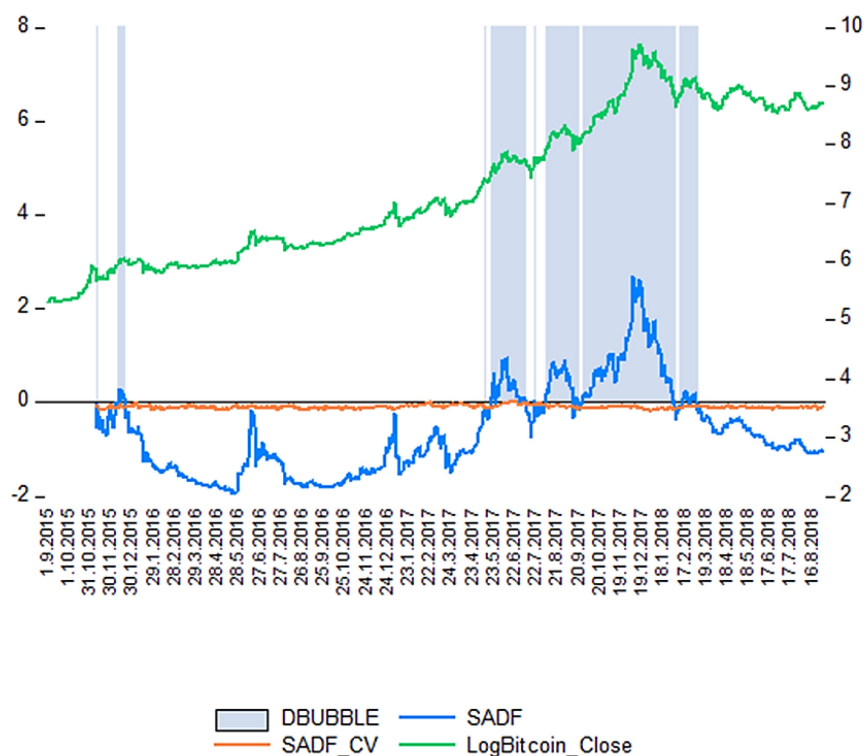
hintojen nousu oli niin radikaalia, että hintakuplan olemassaoloa pidettiin hyvin todennäköisenä ja moni asiantuntija varoitti kehityksestä. Nousu kuitenkin houkutteli lisää sijoittajia markkinoille, kunnes lopulta kupla puhkesi.

Kun tarkastellaan aikamerkinnän avulla löydettyjä hintakuplia, SADF-testissä havaitaan, että yli kuuden päivän hintakuplia testi havaitsee yhteensä viisi kappaletta (Taulukossa 9. GSADF-testi havaitsee siis kaksi hintakuplaa enemmän aikasarjassa. Tuloksista käy ilmi myös, että eri testit havaitsevat hintakuplia hieman eri ajankohdista. SADF-testi ei havaitse esimerkiksi vuoden 2016 hintakuplia ollenkaan.

SADF-testi havaitsee hintakuplan 14.2.2018–7.3.2018, vaikka kyseistä kuplaa ei GSADF-testillä havaittu. Ajanjaksolla Bitcoinin hinta on heti aloituspäivänä noussut 6958,81 eurosta 9 prosenttia ja jatkanut nousua aina 9388,58 euroon. Hintakuplan päättymisajankohdaksi SADF-testi merkitsi 7.3.2018, jolloin Bitcoin oli 8,2 prosenttia laskussa. Syynä laskuun on pidetty Yhdyvaltojen arvopaperimarkkinoita valvoman elimen SEC:in *'Securities and Exchange Commission'*-lausunto, jossa se vaati kryptovaluuttapörssiä rekisteröitymään viranomaisille. (SEC 2018.)

Taulukko 9 SADF hintakuplat Bitcoin 2015–2018

SADF hintakuplat	Kesto/päiviä
19.05.2017– 30.06.2017	43
02.07.2017– 08.07.2017	7
05.08.2017– 13.09.2017	40
25.09.2017– 04.03.2018	133
14.02.2018– 07.03.2018	22



Kuvio 24 Bitcoin 2015–2018 aikamerkintä SADF

SADF-testin aikamerkinnästä nähdään kaikki testin havaitsemat hintakuplat. Kuten GSADF-testissä myös SADF-testissä hintakuplat painottuvat vuoteen 2017, joka on ollut merkittävä Bitcoinin hinnankehityksen kannalta. Testien tulokset tukevat siis tältä osin toisiaan.

5.5 Bitcoin 2013–2018

5.5.1 *Datan kuvailu*

Bitcoin kehitettiin jo vuonna 2008 ja ensimmäiset ”kolikot” laskettiin liikkeelle tammi-kuussa 2009, mutta kryptovaluutan hinta oli pitkään vakaa ja alhainen eikä se ollut sijoituskohteena kovinkaan tunnettu. Bitcoinin käyttäjien määrä on kasvanut eksponentiaalisesti, kun seurataan lähettäjän ja vastaanottajan osoitteiden määrien tilastoja lohkoketjussa vuosien 2011–2015 välillä. Ennen 2012 puoltaväliä transaktioiden määrä Bitcoin lohkoketjussa on ollut todella harvaa, jonka vuoksi se ei tutkimusmielessä ole vertailukelpoinen myöhempisiin ajanjaksoihin. (Chen ja Badev 2014, 18–19.) Vuodesta 2013 eteenpäin Bitcoin on tullut useampien sijoittajien tietoisuuteen ja sen vuoksi tutkielmaan on valittu myös pidempi aikasarja Bitcoinin hinnasta, 2013–2018. GSADF-testi on myös

tietokoneteknillisesti hyvin vaativaa, joten turhan ison otoksen tutkiminen ei ole tutkielman kannalta relevanttia.

Kuviossa 25 näkyy Bitcoinin absoluuttinen hinta euroissa vuosien 2013–2018 väliltä. Graafi näyttää todella dramaattista nousevaa trendiä aikasarjassa, joka on voimakkaimmillaan 2017 alkuvuoden ja 2018 alkuvuoden välillä. Absoluuttisiin hintoihin vaikuttaa kuitenkin myös sijoituskohteen vaihdannan volyymi, joka on selkeästi kasvanut kryptovaluuttojen tullessa sijoittajien laajempaan tietoisuuteen. Vuosien 2013–2015 väliseltä aikaväliltä erottuu vuodenvaihteen 2013–2014 välinen hinnan nousu ja lasku.



Kuvio 25 Bitcoin hinta 2013–2018

Aikasarja muutetaan logaritmiseen muotoon, jotta voidaan tarkastella suhteellisia hinnan muutoksia. Kuviossa 26 nähdään aikasarjasta 2013–2018 laskettu luonnollinen logaritmi.



Kuvio 26 Log-hinta Bitcoin

Log-hinta Bitcoinin kurssista on selvästi trendiltään nouseva ja kaksi selvää huippua on nähtävissä. Toinen on vuoden 2013 lopulla. 29.11.2013 hinta saavuttaa yhden huippunsa 831,40 euroa ja nousee siitä 4.12.2013 vielä noin 850 euroon. Tämän jälkeen joulukuun 2013 aikana hinta putoaa melkein 50 prosenttia 22.12.2013 450 euroon. Hinta vaihtelee tämän jälkeen merkittävästi koko 2014 alkuvuoden kuitenkin trendi on laskeva aina vuoteen 2015 asti. Vuoden 2015 loppuvuoden jälkeen hinta lähtee selkeään nousevaan trendiin, joka jatkuu aina 2018 huippuun asti, jolloin graafissa näkyy toinen selkeä hinnan dramaattinen nousu ja romahdus.

Taulukko 10 Bitcoin 2013–2018 kuvailevat tunnusluvut

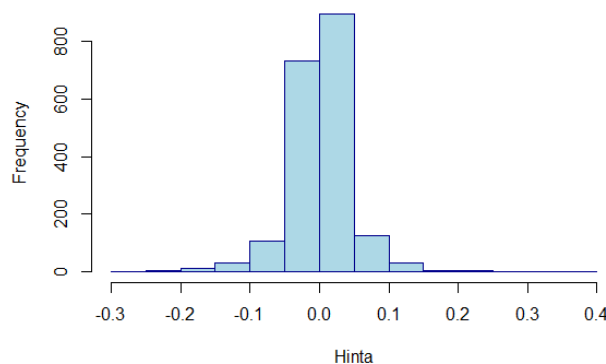
Bitcoin	Hintasarja	Tuottosarja
Havainnot	1952	1951
Keskiarvo	6,481	0,002
Mediaani	6,093	0,002
Maksimi	9,716	0,354
Minimi	3,976	-0,269
Keskihajonta	1,351	0,044
Vinous	0,645	-0,185
Huipukkuus	2,481	10,679

Aikasarjan kuvailevat tunnusluvut näkyvät taulukossa 10 ja ne on laskettu logaritmisista hinnoista ja aikasarjasta ensimmäisen differenssin jälkeen. Hinta-aikasarja sisältää 1952 havaintoa ja keskihajonta on hieman suurempi, mitä lyhyemmältä 2015–2018 aika-

väliltä mitatun Bitcoin aikasarjan keskihajonta. Keskiarvo on matalampi, mitä lyhyemmän aikavälin datassa. Maksimi on kummassakin otoksessa yhtä korkea, joka johtuu 2017–2018 hinnan huipusta. Minimi on selvästi alhaisempi pidemmässä Bitcoin aikasarjassa 2013–2018, joka johtuukin siitä, että Bitcoin on lyhyen historiansa aikana tullut yhä enemmän sijoittajien tietoisuuteen ja hinta on ollut nousujohteinen 2013 eteenpäin.

Hinta-aikasarjan vinousluku on 0,645, josta voidaan päätellä, että jakauma on oikealle painottunut ja sijoituskohte on tarjonnut positiivista tuottoa. Huipukkuus 2,481 on melko korkea ja lähestyy normaalijakauman huipukkuutta 3.

Tuottosarjan perusteella aikavälillä 2013–2018 keskiarvo on ollut nolla. Maksimiarvo on tuottoaikasarjassa selvästi korkeampi kuin lyhyemmässä Bitcoin aikasarjassa 2015–2018 ja myös minimi saa selvästi alhaisemman arvon. Keskihajonta on suurempaa pidemmässä aikasarjassa. Tuottoaikasarja nähdään myös kuviossa 27, josta nähdään havaintojen jakauma. Havaitaan, että jakauma on oikealle painottunut.



Kuvio 27 Tuottojen jakauma Bitcoin 2013–2018

Jakaumasta nähdään, että suuri osa tuotoista keskittyy nollan molemmiin puolin ja poikkeavia havaintoja on hieman vähemmän kuin aikaväliltä 2015–2018 tarkastellusta Bitcoinin aikasarjassa.

5.5.2 Kriittiset arvot ja testitulos

GSADF-testi tehdään Bitcoinin log-aikasarjalle aikavälitä 2013–2018, johon sisältyy yhteensä 1952 havaintoa. Testissä käytetään kiinteää viivettä $k = 0$. GSADF-testin tulos ylittää kriittiset arvot kaikilla merkitsevyystasooilla ja on tilastollisesti merkitsevä. Nollahypoteesi yksikköjuuresta voidaan hylätä ja testin perusteella todeta, että aikasarjassa on räjähdyksmäistä käytöstä, joka viittaa hintakuplien olemassaoloon.

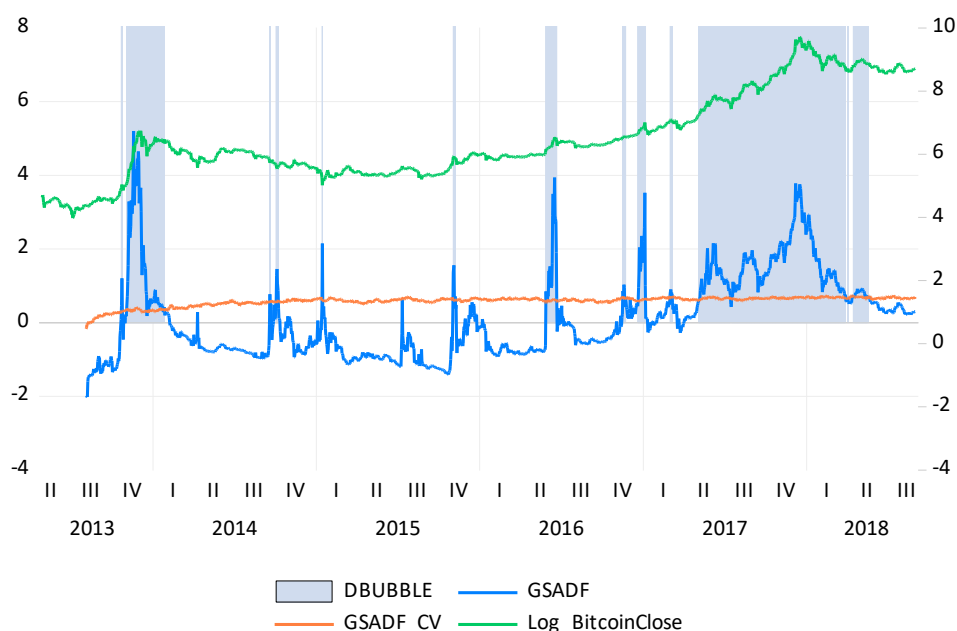
Taulukko 11 Kriittiset arvot ja merkitsevyystasot Bitcoin 2013–2018

	GSADF	SADF
Testitulos	5,205***	4,722***
99 %	2,957	2,105
95 %	2,473	1,579
90 %	2,224	1,312

SADF-testillä saadaan vastaava tulos, jossa nollahypoteesi voidaan hylätä vahvoin perustein. Testitulos on 4,722, joka ylittää kriittiset arvot kaikilla merkitsevyystasoilla. Sekä GSADF-testin että SADF-testin tulokset ovat korkeammat Bitcoinin aikasarjassa aikaväliltä 2013–2018 verrattuna lyhyempään aikaväliin 2015–2018.

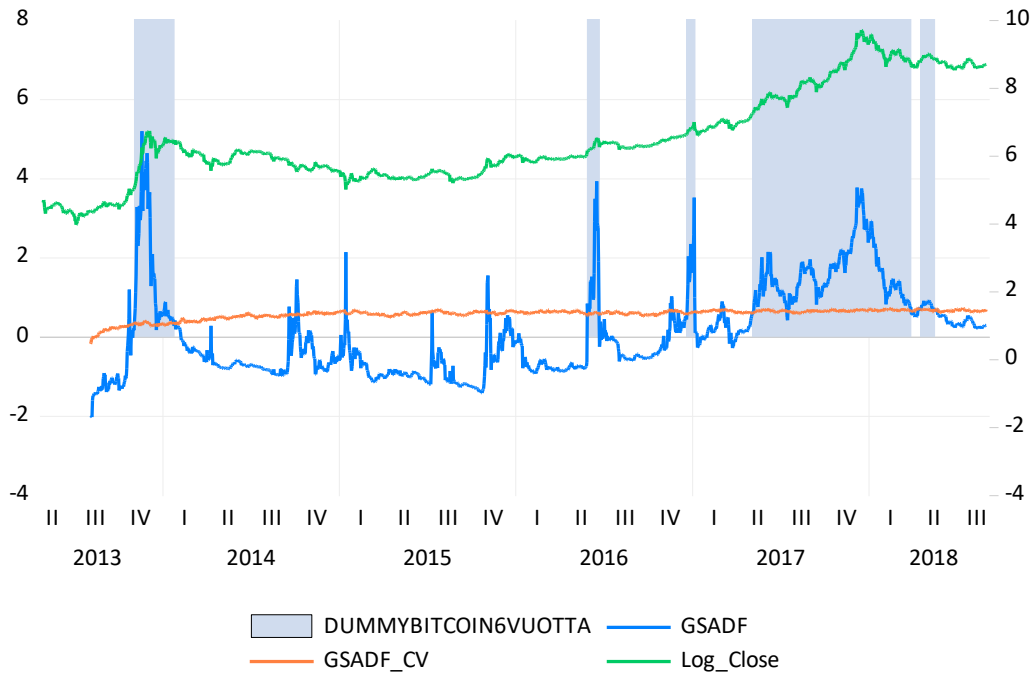
5.5.3 Aikamerkinnot

Hintakuplien alkamis- ja päätöspäivät aikamerkitään BSADF-testiä hyödyntäen, jonka mukaan Bitcoinin aikasarjassa 2013–2018 on useita hintakuplia. Merkittävimpiä hintakuplia voidaan havaita vuodenvaihteesta 2013–2014, vuoden 2017 aikana ja alkuvuodesta 2018. Hintakuplien aikamerkinnot nähdään kuviossa 28.



Kuvio 28 BSADF-hintakuplat Bitcoin 2013–2018

Tarkempaan tarkasteluun otetaan mukaan hintakuplat, jotka ylittävät kriteerin $\text{Log}(1951) \approx 7,576$ eli hintakuplat, jotka kestävät yli seitsemän päivää. Kuviossa 29. nähdään kriteerin ylittämät ajanjaksolle aikamerkatut hintakuplat, joita on aikavälillä yhteensä seitsemän. Kuviossa osa hintakuplista näyttää yhdeltä pidemmältä hintakuplalta, sillä edellisen hintakuplan päättymisen ja uuden hintakuplan alkamisen välille on jäänyt vain muutamia päiviä.



Kuvio 29 Bitcoin BSADF-aikamerkintä 2013–2018

Taulukossa 12 nähdään kaikki BSADF-testin aikamerkitsemät hintakuplat, jotka ylittävät seitsemän päivää. Testi ei havaitse ainuttakaan hintakuplaa vuonna 2015 Bitcoinin aikasarjassa. Tulos on yhtenäinen lyhyemmän aikaperiodin 2015–2018 kanssa. Vuosi 2017 on myös pidemmän aikasarjan perusteella ajanjaksona merkittävä. Pidemmästä aikasarjasta 2013–2018 otettu testi havaitsi myös hintakuplien jatkumisen pitkälle vuoteen 2018, joka eroaa hieman lyhyemmän aikasarjan osoittamista tuloksista.

Taulukko 12 Bitcoin 2013–2018 hintakuplat

Hintakuplat	Kesto/päiviä
03.11.2013– 17.12.2013	45
19.12.2013– 23.01.2014	36
28.05.2016– 21.06.2016	25
20.12.2016– 05.01.2017	17
05.05.2017– 14.07.2017	71
17.07.2017– 28.03.2018	255
18.04.2018– 16.05.2018	29

Ensimmäinen hintakupla havaitaan marraskuun ja joulukuun vaihteesta 2013, jolloin hintakuplan kesto on yhteensä 45 päivää. Kaksi päivää hintakuplan päättymisestä alkaa uusi hintakupla, joka jatkuu aina tammikuun lopulle 2014. Hinnan kehitys oli kesään 2013 asti laskusuhdanteista ja heinäkuusta eteenpäin kurssi lähti kehittymään positiiviseen suuntaan.

Cheung ym. (2015) havaitsivat myös GSADF-menetelmällä hintakuplia Bitcoinin datassa tarkastellessaan aikaväliä 2010–2014. He aikamerkitsivät hintakuplan 5.11.2013–18.2.2014, joka on linjassa tutkielman havaitsemien kahden ensimmäisen hintakuplan kanssa. Tässä tutkielmassa on kuitenkin havaittu kaksi erillistä hintakuplaa ajanjaksolta. Eroavaisuudet voivat johtua myös siitä, että Cheung ym. (2015) datana on käytetty Mt. Gox pörssin hintoja. Corbet ym. (2018) havaitsivat myös saman hintakuplan Bitcoinin aikasarjassa vuodenvaihteen 2013–2014 aikana.

Hinta oli hintakuplan alkamispäivänä 159,44 euroa ja nousi kuukaudessa 849,16 euroon. Päättymispäivän jälkeen hinta laski 379,80 euroon, joten taustalla olevat hinnan muutokset ovat olleet voimakkaita. Kaksi päivää hintakuplan päättymisestä, alkoi uusi hintakupla, jonka aikana hinta nousi jälleen lähes 700 euroon.

Hinnan nousun taustalla voidaan osittain nähdä syyskuussa 2013 uutisoinnit Yhdysvaltojen keskuspankin puheenjohtajan lausunnoista liittyen digitaalisiin valuuttoihin. Ben Bernanke (2013) kirjoitti lausunnossaan Bitcoinin olevan innovaatio, joka voi mahdollistaa tulevaisuudessa tehokkaamman ja turvallisemman tavan rahansiirrolle. Lausunnossa nousevat kuitenkin esiin myös rahanpesuun ja muuhun rikolliseen toimintaan liittyvät riskit. Samanaikaisesti esiin nousivat myös Saksan viranomaisten lausunnot, joissa Bitcoinilla sanottiin olevan samankaltaisia ominaisuuksia kuin virallisilla valuutoilla. (Corbet 2018.)

Shiller (2017) näkee, että Bitcoinin hinnannousun takana 2013 oli pääosin tarina, joka vetosi sijoittajiin ja levisi nopeasti. Bitcoin nähtiin uutena valuuttana, joka toimi digitaalisesti ilman valtion kontrollia tai väliintuloa. Tarina vetosi erityisesti itsenäisiin, kapitalistisiin ja valtion sääntelyä kritisoiviin henkilöihin. Hänen mukaansa tarinaan loi vetovoimaa myös taustalla toimiva teknologia, joka oli monimutkaista ja harvoille ymmärrettävää. Kiinnostusta lisäsi entisestään se, että teknologian kehittäjä Satoshi Nakamoto

pysyi anonyyminä ja loi mysteerin Bitcoinin ympärille. Hän selittää hintakuplaa siis pääosin psykologisten tekijöiden kautta ja spekulatiivisena ilmiönä 2013–2014 hintakuplan aikana. Samalla linjalla on taloustieteen Nobelisti Krugman (2013), joka uskoo Bitcoinin hinnan perustuvan ainoastaan siihen, että se kuulostaa vaikuttavalta.

Vuonna 2013 pääosa Bitcoinin vaihdannasta on arvioitu olleen Kiinassa ja Yhdysvalloissa (Yermack 2013, 8). Kiinan suhtautuminen kryptovaluuttoihin oli alusta asti kielteinen ja loppuvuodesta 2013 PBOC kielsi rahoitusinstituutioita käyttämästä Bitcoinia, joka sai kurssilaskun aikaan Bitcoinissa ja mahdollisen hintakuplan puhkeamaan (Wheatley ym. 2018, 8–9). Vastoinikäymisenä oli myös tammikuussa, kun kiinalainen verkkokauppa Alibaba kielsi Bitcoinin ja muiden kryptovaluuttojen käytön kaikilta samaan verkostoon kuuluvilta verkkokaupoilta.

Vuoden 2013 aikana suurin kryptovaluuttoja välittänyt pörssi Mt. Gox koki suuria vastoinkäymisiä ja helmikuussa 2014 pörssi hakeutui konkurssiin. Hintakuplan puhkeaminen saattoi hyvin olla syy pörssin lopulliseen sulkeutumiseen. (Cheung ym. 2015.) Konkurssiin hakeutuminen tapahtui pian sen jälkeen, kun Mt. Gox -pörssi kadotti noin 750 000 eri käyttäjien Bitcoinia (arvoltaan 450 miljoonaa dollaria) ja sanoi syynä olleen ulkopuolinen hakkerointi järjestelmään (Stowe 2014).

BSADF-testi ei havaitse kahdeksan päivän mittaista hintakuplaa 26.10–2.11.2016, jonka se havaitsi lyhyemmästä Bitcoinin aikasarjasta aikaväliltä 2015–2018. Hintakupla on kuitenkin melko lyhyt, juuri yli sallitun minimikeston pidemmässä aikasarjassa. Hintakupla 20.12.2016–5.1.2017 tukee myös lyhyemmän aikasarjan havaitsemaa hintakuplaa.

Toukokuussa 2017 alkanut hintakupla on havaittu myös lyhyemmän aikasarjan kohdalla, mutta alkamispäivä on aikamerkinnän mukaan muutamia päiviä myöhemmin. Pidemmälle 2013–2018 Bitcoin aikasarjalle tehdyn testin mukaan hintakupla jatkuu heinäkuuhun 2017 asti, kun taas lyhyemmän aikasarjan kohdalla, BSADF-testi on havainnut kaksi hintakuplaa aikavälillä, joiden välillä on ollut vain kaksi päivää. BSADF-testi antaa siis hieman ristiriitaisia tuloksia eri pituisille aikasarjoille, kun hintakuplien välillä on vain muutamia päiviä.

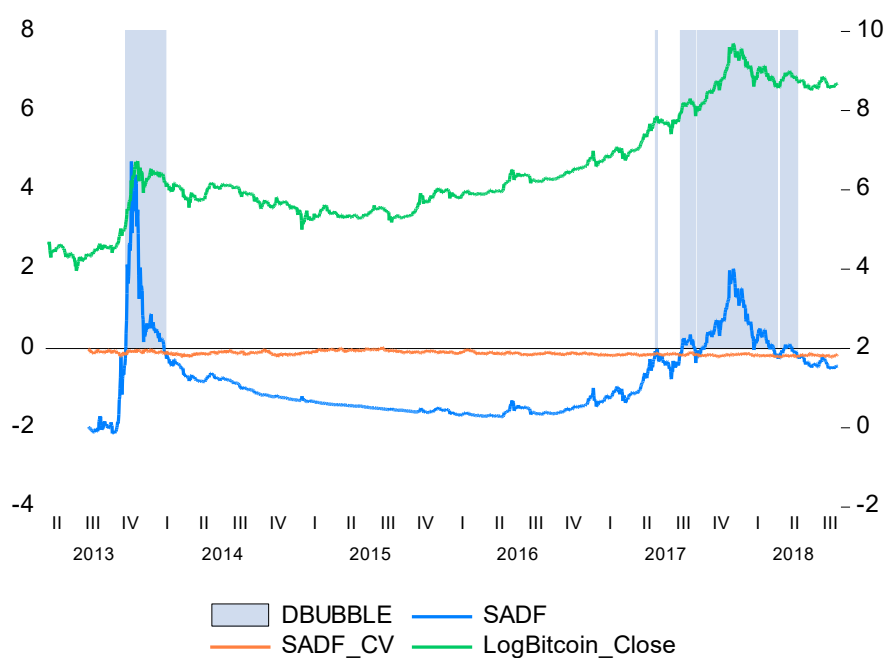
Pisin ja merkittävin hintakupla ajanjaksolla 2013–2018, on vuodenvaihteen 2017–2018 hintakupla, joka BSADF-testin mukaan kesti, jopa 255 päivää ja hintakupla puhkesi vasta maaliskuun lopussa 2018. Lyhyemmälle aikasarjalle 2015–2018 tehty BSADF-testi merkitsi hintakuplan päättymisen jo tammikuun loppuun, joten testit antavat eroavat tulokset. Bitcoinin aikasarjaan 2013–2018 tehty BSADF-testi havaitsi vielä yhden hintakuplan huhti-toukokuussa 2018, jota lyhyemmästä aikasarjasta ei havaittu. Hinta nousi hintakuplan alkamispäivänä 6595,64 euroon ja jatkoi nousua toukokuun huippuunsa 8262,98, jonka jälkeen hinta lähti laskuun jälleen.

SADF-testin aikamerkinnän havaitsemat hintakuplat ovat taulukossa 13 ja voidaan havaita, että hintakuplia havaitaan huomattavasti vähemmän kuin GSADF-testiin perustuvalla aikamerkinnällä.

Taulukko 13 SADF-hintakuplat Bitcoin 2013–2018

SADF hintakuplat	Kesto/päiviä
04.11.2013– 09.02.2014	98
10.08.2017– 13.09.2017	35
25.09.2017– 30.03.2018	187
12.04.2018– 22.05.2018	41

Kuviossa 30 havainnollistetaan hintakuplien ajankohtia aikavälillä 2013–2018, jotka SADF-testin perusteella tehty aikamerkintä on havainnut.



Kuvio 30 Aikamerkintä SADF Bitcoin 2013–2018

SADF-testi kuitenkin havaitsee suurimmat hintakuplaperiodit vuodenvaihteessa 2013–2014 sekä vuodenvaihteessa 2016–2017, joka tukee GSADF-testiin perustuvia tuloksia. Myös SADF-testi tukee GSADF-testin havaitsemaa toista hintakuplaa vuoden 2018 puolella, joka ajoittuu huhti-toukokuulle.

5.6 Ethereum

5.6.1 Kriittiset arvot ja testitulokset

Ethereumin aikasarja aikaväliltä 2015–2018 sisälsi yhteensä 1096 havaintoa ja GSADF-testi tehtiin kiinteällä viiveellä $k = 0$. Taulukossa 14 oleva GSADF-testin tulos on tilastollisesti merkitsevä ja ylittää kriittiset arvot kaikilla merkitsevyystasoilla. Voidaan hylätä nollahypoteesi eli yksikköjuuri ja tulos viittaa räjähdysmäiseen käytökseen aikasarjassa.

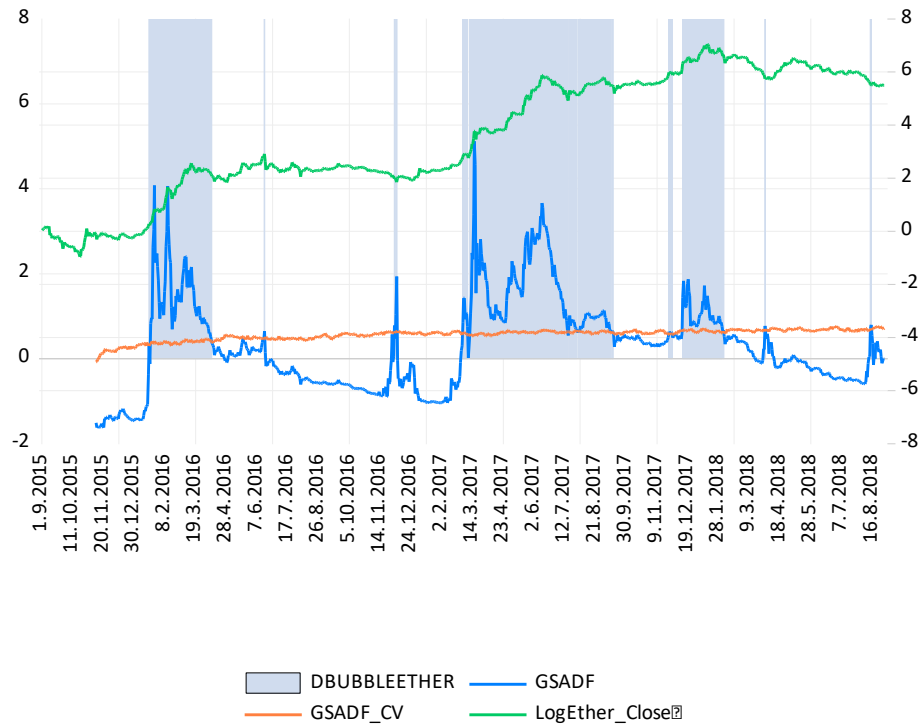
Taulukko 14 GSADF- ja SADF-tulokset ja kriittiset arvot Ethereum

	GSADF	SADF
Testitulos	5,120***	2,281***
99 %	2,924	2,062
95 %	2,362	1,593
90 %	2,123	1,273

Taulukossa 14 nähdään myös SADF-testin tulos, johon voidaan verrata GSADF-testin tehoa. Huomataan, että myös SADF-testituloksen nojalla nollahypoteesi voidaan hylätä ja aikasarja antaa viitteitä hintakuplasta.

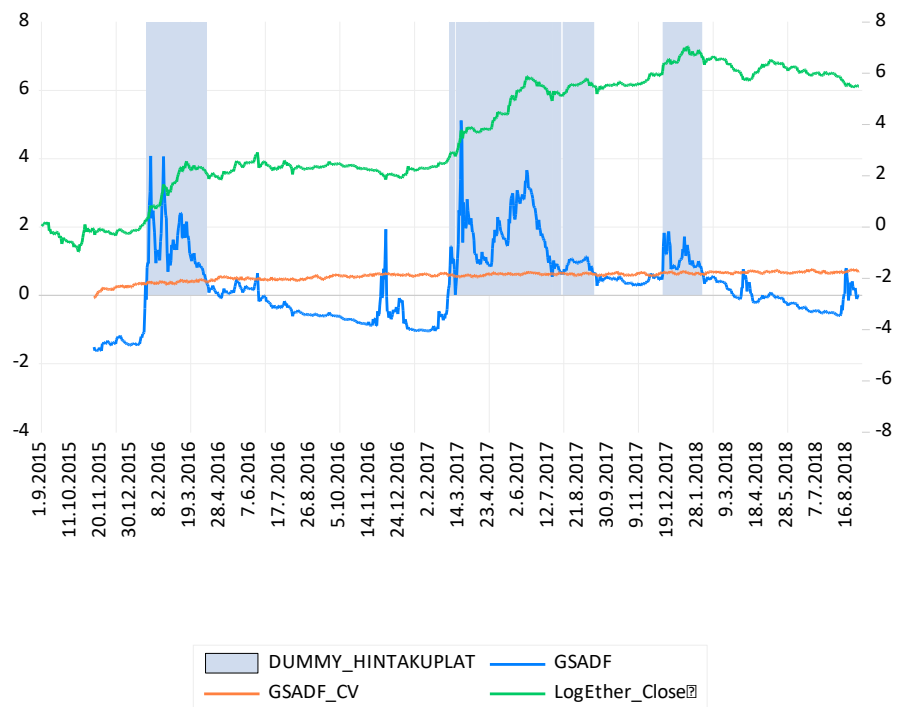
5.6.2 Aikamerkinnot

Ethereumin aikasarjaan tehdään hintakuplien aikamerkintä hyödyntäen BSADF-testiä ja kuviosta 31 nähdään aikamerkinnot. Kuviossa nähdään Ethereumin hinnan kehitys vihreänä viivana 2015–2018 ja hintakuplan alkamis- ja päättymisajankohdat on merkitty palkkeina. Heti voidaan havaita, että BSADF-arvo on ylittänyt GSADF-testin kriittiset arvot useaan otteeseen aikaperiodilla. Testi havaitsee useita peräkkäisiä hintakuplia, joiden välillä on vain muutamia päiviä. Osan hintakupliasta aikamerkintä on tämän vuoksi yhdistänyt yhdeksi.



Kuvio 31 Aikamerkintä Ethereum BSADF

Tarkempaan tarkasteluun sisällytetään ainoastaan hintakuplat, joiden kesto on ylittänyt ehdon $\log(1096)$ eli minimikesto on 7 päivää. Kuviossa 32 nähdään tarkasteluajanjakson aikana olleet tutkielman kannalta merkitykselliset hintakuplat.



Kuvio 32 Ethereum hintakuplat BSADF (>6 päivää)

Kun otetaan huomioon yli kuuden päivän hintakuplat kuvio näyttää kolme selkeää eri hintakuplan merkkejä osoittavaa ajanjaksoa. Osassa ensimmäisen hintakuplan päättymisen ja seuraavan alkamisen välillä on vain muutamia päiviä, joten aikamerkinnässä ne ovat yhdistyneet yhdeksi. Yhteensä yli kuuden päivän kuplia GSADF-testi havaitsi kuusi kappaletta, jotka on merkitty taulukkoon 15.

Taulukko 15 Hintakuplat Ethereum

Hintakuplat	Kesto/päiviä
20.01.2016– 08.04.2016	80
01.03.2017– 07.03.2017	7
10.03.2017– 15.07.2017	128
17.07.2017– 27.07.2017	11
31.07.2017– 09.09.2017	41
12.12.2017– 01.02.2018	52

Aikamerkinnästä nähdään, että aikasarjassa olevien hintakuplien kesto vaihtelee viikosta yli neljään kuukauteen. Suurin osa hintakuplista havaitaan vuoden 2017, joka on kaikkien kryptovaluuttojen ollut hinnan nousun osalta merkittävä.

Ethereum julkaistiin 30.7.2015, joten tutkielmaan sisältyy päivittäistä aikasarjadataa melkein koko Ethereumin olemassaolon ajalta. Ensimmäinen hintakupla havaitaan GSADF-testin mukaan 20.1.2016–8.4.2016 ja sen kesto on yhteensä 80 päivää. Kurssi on ollut 20.1.2016 eli hintakuplan alkamispäivänä 1,40 euroa ja noussut periodin aikana parhaimmillaan 12,98 euroon, mikä tarkoittaa lähes 90 prosentin hinnan nousua. Sama hintakupla oli havaittu Corbet ym. (2018) tutkimuksessa GSADF-menetelmällä. Prosentuaalisesti nousu on ollut huimaa ja korkeimmillaan yhden päivän aikana yli 30%. Kehitys hintakuplan jälkeen on ollut tasaisempaa aina maaliskuuhun 2017 asti.

Ensimmäisen hintakuplan aikana Ethereum protokollaa päivitettiin, joka selittää hinnan nousua Ethereumissa. Hinta saavutti huippunsa 13. maaliskuuta ja sitä seuraavana päivänä, 14. maaliskuuta 2016 Ethereum lohkoketjuun tehtiin *'homestead'*-päivitys, joka suoritettiin *'hard fork'*-päivityksenä lohkoketjuun. Tämä tarkoitti, että kaikkien käyttäjien tuli päivittää ohjelmisto uuteen versioon. Aikaisempi *'frontier'*-nimellä kutsuttu alusta oli niin kutsuttu beta-versio eli kokeiluversio, joka oli tarkoitettu sovelluskehittäjille kokeiluun, oppimiseen ja mahdollisuuteen aloittaa sovellusten kehittämistä Ethereum-alustaan. Uusi päivitys oli virallinen tuotantokäyttöön tarkoitettu alusta, joka mahdollisti Ethereumin päivitykset jatkossa ja alustan toimivuuden kehittämisen. (Ethdocs.org 2016.)

Maaliskuun 2017 aikana havaitaan kaksi hintakuplaa, joista toinen on kestoaltaan ainoastaan viikon ja toinen 128 päivää. Hintakuplien välillä on vain 2 päivää. Ethereumin hinta hintakuplan alkamispäivänä 10.3.2017 oli 18,14 euroa ja päättymispäivänä 15.7.2017 hinta oli 143,06 euroa, joka tarkoitti jälleen lähes 90 prosentin hinnan nousua.

Hintakuplan aikana Ethereumin hinnan nousu on tasaista ja nousi aina päättymispäivään asti, maksimin ollessa 140 euron yläpuolella. Kaksi päivää hintakuplan päättymisen jälkeen BSADF-testi merkkää jo seuraavan hintakuplan alkaneeksi ja hinnan nousu jatkuu. Muutaman päivää hintakuplan päättymisen jälkeen alkaa vielä neljäs hintakuplaperiodi muutaman päivän sisällä aiemman päättymisestä. Vuoden 2017 hinnan nousun taustalla voidaan nähdä samoja hintojen spekulointiin liittyviä syitä, kuin muidenkin kryptovaluuttojen kohdalla. Vuosi 2017 näyttää BSADF aikamerkinnän perusteella olleen Ethereumin kohdalla hintakuplasta toiseen etenemistä, samalla kun hinta on jatkuvasti noussut.

Ethereumin kehitystyö ei päättynyt ensimmäiseen *'hard forkiin'*, vaan seuraava päivitys, jota kutsuttiin nimellä *'Metropolis'* piti sisällään kaksi vaihetta, joista ensimmäinen oli *'Byzantium'*. Lokakuussa 2017 Ethereum lohkoketjua päivitettiin *'Byzantium'*-päivityksellä, missä lohkoketju jakautui kahtia ja muun muassa lohkoketjun turvallisuutta ja nopeutta parannettiin. Myös louhinnasta saatavia palkkioita pienennettiin, joka oli valmistelua *'Proof of Stake'*-protokollaan siirtymiseen. (Buterin, 2016.) Hinnan nousua voidaan selittää Ethereumin kohdalla osittain teknologian parannuksilla ja alustan päivityksillä.

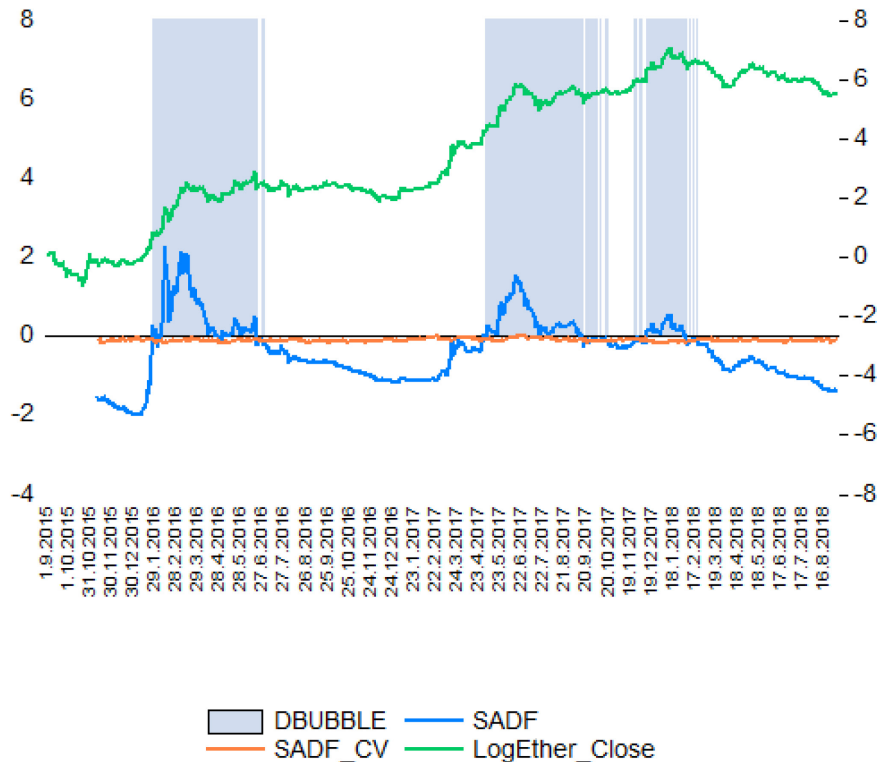
Radikaalein kehitys Ethereumin hinnassa on viimeisen hintakuplan aikana 12.12.2017–1.2.2018, jolloin jo pitkään noussut hinta alkaa kiihtyä eksponentiaalisesti. Ethereum saavuttaa kaikkien aikojen huippunsa 13.1.2018, jolloin hinta on 1149,65 euroa. Hinnan muutos on merkittävä, jos vertaa esimerkiksi vuoden takaiseen noin 9 euron hintaan. Hintakuplan puhjettua Ethereumin hinta lähtee tasaiseen laskuun, muutamia hetkellisiä nousuja lukuun ottamatta. Aikasarjadataan viimeisenä päivänä 31.8.2018 Ethereumin hinta oli enää noin 243 euroa. Vuodenvaihteen 2017–2018 hintakuplan puhkeamisen taustalla voidaan nähdä jo aiemmin mainittu Kiinan ICO:jen kiello ja sääntelyn lisääntyminen.

SADF-testin tulokset viittaavat myös hintakuplan olemassaoloon aikasarjassa, joten tarkastellaan myös SADF-testin aikamerkintää ja havaittuja hintakuplia.

Taulukko 16 SADF-hintakuplat Ethereum

SADF hintakuplat	Kesto/päiviä
02.02.2016– 17.06.2016	137
30.04.2017– 15.07.2017	77
17.07.2017– 13.09.2017	59
23.09.2017– 02.10.2017	10
11.12.2017– 04.02.2018	56

SADF-testi havaitsee yhteensä viisi hintakuplaa eli vain yhden vähemmän kuin GSADF-testi. Hintakuplat ja niiden kestot näkyvät taulukossa 16 Kuviossa 33 havainnollistetaan hintakuplien ajankohtia.



Kuvio 33 Aikamerkintä SADF Ethereum

Pituudeltaan merkittävin hintakupla kestää 137 päivää. Myös GSADF-testi havaitsi kyseisen hintakuplan, mutta hintakuplien kestot eroavat testeissä. SADF-testin mukaan hintakupla jatkuu 2016 kesäkuuhun asti, kun taas GSADF-testi havaitsi hintakuplan päätymisen jo huhtikuussa.

GSADF-testi havaitsee myös lyhyen 7 päivän hintakuplan maaliskuussa 2017, jota SADF-testi ei havainnut aikasarjassa. Molemmat testit havaitsevat vuoden 2017 aikana useita peräkkäisiä hintakuplia, joiden välissä on vain muutamia päiviä. Ethereumin voimakkein, vuoden vaihteen 2017–2018 hintakupla on molemmissa testeissä lähes sama.

5.7 Litecoin

5.7.1 Kriittiset arvot ja testitulokset

Litecoinin aikasarjaan tehtiin GSADF-testi aikavälille 2015–2018 ja havaintoja oli yhteensä 1096. Testissä käytettiin kiinteää viivettä $k = 0$. GSADF-testin tulos on selvästi yli kriittisten arvojen kaikilla merkitsevyystasoilla. Testin perusteella nollahypoteesi yksikköjuuresta voidaan hylätä mikä viittaa aikasarjan räjähdysmäiseen käytökseen.

Taulukko 17 Kriittiset arvot ja testitulos Litecoin

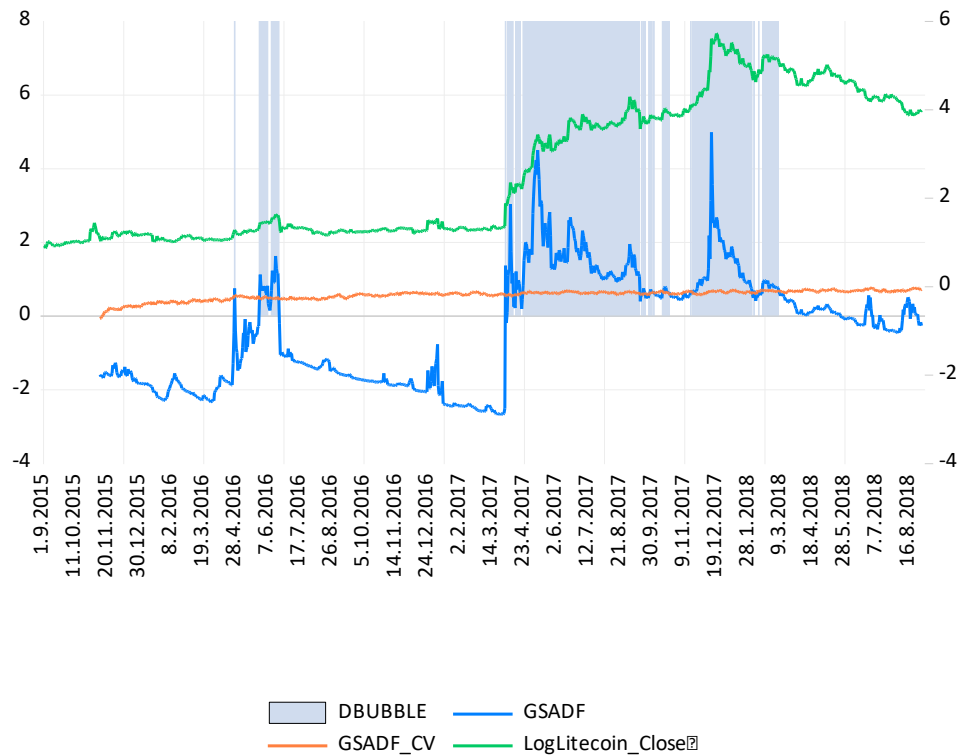
	GSADF	SADF
Testitulos	4,986***	4,159***
99 %	2,924	2,062
95 %	2,362	1,593
90 %	2,123	1,273

Taulukossa 17 nähdään myös SADF-testin tulos, joka ylittää kriittiset arvot kaikilla merkitsevyystasoilla, jolloin nollahypoteesi yksikköjuutesta voidaan hylätä ja testitulos tukee GSADF-testin tulosta.

5.7.2 Aikamerkinnot

Litecoin on ollut hinnaltaan tutkielman kryptovaluutoista alhaisin suurimman osan aikavälistä 2015–2018, mutta hinta on muiden kryptovaluuttojen tavoin prosentuaalisesti heilahdellut merkittävästi. Litecoin on tullut markkinoilla 2011, noin kaksi vuotta Bitcoinin jälkeen. Litecoina on usein verrattu Bitcoinin, sillä se on rakennettu Bitcoin ohjelmointin päälle ja perustuu samaan 'peer-to-peer'-protokollaan, kuin Bitcoin. Ohjelmointiin tehtyjen parannusten vuoksi Litecoinilla oli myös mahdollisuudet haastaa Bitcoin aikaisessa vaiheessa. (Takashima 2018, 2.)

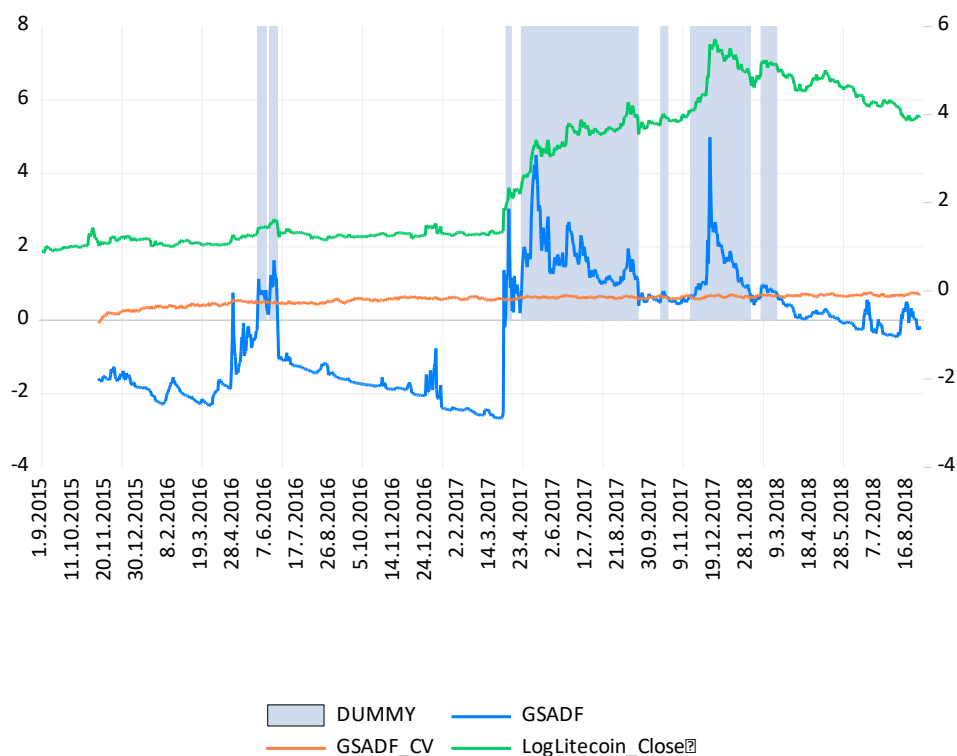
Hintakuplat merkitään aikasarjaan hyödyntäen BSADF-arvoja ja kuvio 34 havainnollistaa aikavälillä 2015–2018 havaittuja hintakuplia.



Kuvio 34 Litecoin aikamerkitä GSADF

Hintakuplat näyttävät painottuvan vuoteen 2017, jonka aikana on havaittavissa useita peräkkäisiä hintakuplia. Hintakuplaan viittaavia tuloksia näkyy myös vuoden 2016 puolivälissä.

Tutkielmassa perusteellisempaan tarkasteluun otetaan mukaan hintakuplat, jotka ylittävät $\text{Log}(1096)$ kriteerin eli alle 7 päivän hintakuplia ei huomioida. Kriteerin jälkeen havaitaan hintakuplia yhteensä seitsemän kappaletta. Suurin osa hintakuplista painottuu vuoteen 2017, joka on kryptovaluuttojen kannalta ollut poikkeava vuosi. Tämän lisäksi testi havaitsee hintakuplia vuoden 2016 puolessavälissä ja vuoden 2018 alkupuolella. Hintakuplia havainnollistetaan kuviolla 35.



Kuvio 35 Hintakuplat BSADF Litecoin (>6 päivää)

Kuviossa näkyy myös Litecoinin log-hinta vihreänä viivana. Hintakuplien alkamis- ja päättymisajankohdat sekä kesto päivinä on kerätty taulukkoon 18.

Taulukko 18 Hintakuplien aikamerkintä Litecoin

Hintakuplat	Kesto/päiviä
27.05.2016– 06.06.2016	11
11.06.2016– 20.06.2016	10
02.04.2017– 08.04.2017	7
21.04.2017– 13.09.2017	146
12.10.2017– 20.10.2017	9
18.11.2017– 31.01.2018	75
14.02.2018– 05.03.2018	20

Vuonna 2016 GSADF-testi havaitsee kaksi hintakuplaa. Ensimmäisen ja toisen hintakuplan välillä on ainoastaan neljä päivää ja ne ovat kestoiltaan puolentoista viikon mittaisia. Ensimmäisen hintakuplan aikana hinta nousee muutamia prosentteja ja laskee hintakuplan päättymisen jälkeen. Toisen hintakuplan aikana hinta vaihtelee 4,43 eurosta yli viiteen euroon ja laskee hintakuplan päättymisen jälkeen 4,27 euroon. Hinnan nousun taustalla voidaan nähdä Bitcoinin tavoin sijoittajin kasvava kiinnostus ja Kiinan Yuanin arvon laskeminen. (Li ym. 2018.)

Vuoden 2017 hintakuplat esiintyvät myös melko peräkkäin. Ensimmäisen hintakuplan GSADF-testi havaitsee huhtikuun alussa 2.4.2017 ja se on vain noin viikon mittainen.

Hintakuplaa edeltää 29.3.–30.3. hinnan nousu, joka on noin 66,8 prosenttia. Kuitenkin testi merkitsee hintakuplan alkamaan vasta 2.4.2017. Maaliskuun lopun radikaalin hinnan nousun syytä ei tiedetä. Hintojen nousu saattoi houkutella lisää sijoittajia, joka aiheutti hintakuplan synnyn huhtikuun alussa. Hinta nousi 2.4.2017–8.4.2017 välisenä aikana 7,24 eurosta yli 10 euroon.

Litecoinin hinnan nousun taustalla on nähty olleen osittain lohkoketjun päivittäminen SegWit-protokollaan '*Segregated Witness*', jonka oli määrä tulla voimaan 2017 aikana. SegWit tulee voimaan, mikäli kahden viikon periodin aikana 75% louhijoista osoittavat tukensa ohjelmoinnin muutokselle. Odotukset uudesta protokollasta, sekä vastoinikäymiset ja niistä uutisointi ovat näkyneet hinnan muutoksissa 2017 aikana. SegWit on suunniteltu nopeuttamaan transaktioita lohkoketjussa muokkaamalla lohkon kokoa kapasiteettitarpeen mukaan. Kuitenkin monet asiantuntijat kyseenalaistivat tarpeen protokollalle Litecoinin lohkoketjussa, jossa transaktioita oli ajanjaksona noin viidennes Bitcoinin kaikkien transaktioiden määrästä. (Coindesk.com 2017a.)

Hintakuplan alkamisajankohtana 21.4.2017 Litecoinin arvo oli noin kymmenen euroa. Arvo tuplaantui noin kahdessa viikossa ja jatkoi jyrkkää nousua. Korkeimmillaan kurssi oli hintakuplan aikana 1.9.2017, jolloin se oli noussut yli 70 euroon. GSADF-testi merkitsi hintakuplan päättymispäiväksi 13.9.2017. Hinta romahti hintakuplan päättymisen jälkeen 51,80 eurosta 35,02 euroon eli noin 32 prosenttia yhden päivän aikana.

Kiinan keskuspankki PBOC julkaisi syyskuun alussa lausunnon ICO:jen kieltämisestä ja yleisen sääntelyn lisäämisestä kryptovaluuttamarkkinoille, joka sai kryptovaluuttojen kurssit laskemaan ja mahdollisesti johti myös Litecoinin hintakuplan puhkeamaan. (Coindesk.com 2017b.) Romahdus ei ollut kuitenkaan pysyvää, sillä hinta lähti tästä eteenpäin kehittymään jälleen nousujohteisesti.

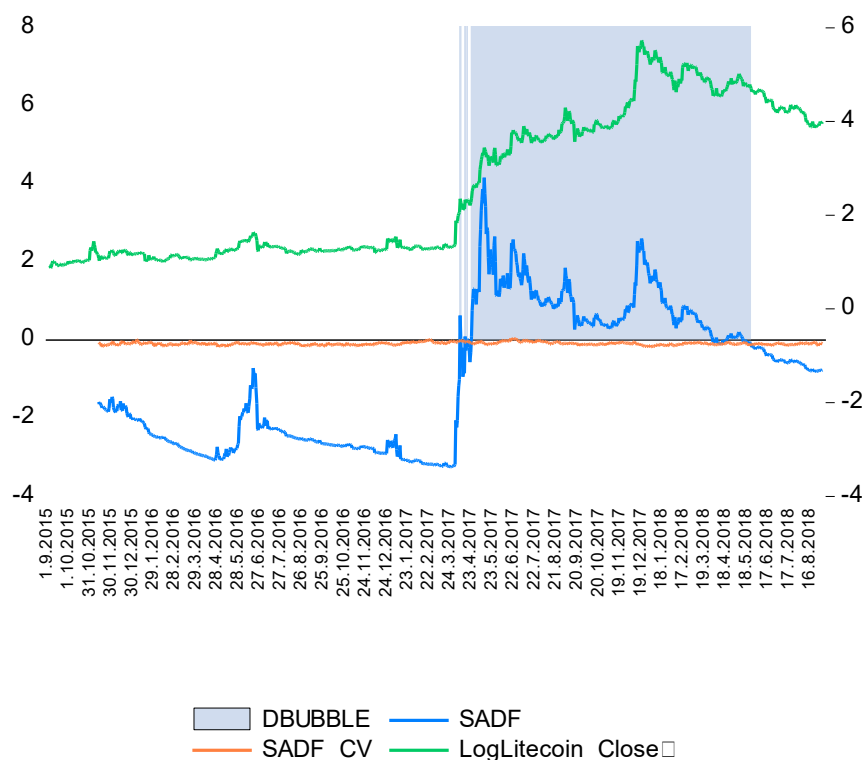
GSADF-testi merkitsi seuraavan kuplan alkamisajankohdan kuukausi edellisen jälkeen 12.10.2017, jolloin havaittiin 9 päivän mittainen hintakupla. Lyhyen hintakuplan jälkeen menee noin kuukausi hintakuplan päättymisestä, jolloin BSADF merkkää seuraavan hintakuplan, joka on kestoltaan 75 päivää ja alkaa 18.11.2017. Tämä ajanjakso on myös hintamuutoksiltaan merkittävämpi ja sijoittuu yleiseen kryptovaluuttamarkkinoiden hintakuplaan 2017–2018 vuodenvaihteessa. Hintakuplan alkamispäivän kurssi on 59,10 euroa ja päättymispäivän 131,13 euroa. Hintakuplan huipulla 18.12.2017 Litecoinin hinta kävi 303,36 eurossa, joka tarkoittaa hinnan nousua hintakuplan alkamispäivästä yli 120 prosenttia.

Joulukuun 20. 2017 Litecoinin perustaja Charlie Lee ilmoitti myyneensä ja lahjoittaneensa kaikki Litecoininsa. Syyksi perustava ilmoitti sen, että Lee:tä oli syytetty useaan otteeseen kurssin manipuloinnista kirjoituksillaa internetissä. Omien sanojensa mukaan, hän päätti myydä Litecoininsa, jotta vastaavaa syytöstä ei enää voida tehdä. (Lee 2017.) Mielenkiintoista on kuitenkin se, että Lee suoritti myyntinsä juuri oikeaan aikaan ennen hintakuplan romahtamista. Hinta oli noussut kuukaudessa noin 60 eurosta yli 300 euroon

18.12.2017, joka oli vain kaksi päivää ennen Lee:n päätöstä myydä omistuksensa. Myyntihetkellä kurssi oli 264,80 euroa. Voidaan olettaa Lee:n tienneen hintakuplan olemassaolon ja poistuneen markkinoilta juuri oikeaan aikaan. Omistajan luottamuksen loppuminen kryptovaluuttaan saattoi olla suurimpana syynä hintakuplan puhkeamiseen.

GSADF-testi havaitsee vielä yhden 20 päivän pituisen hintakuplan helmi-maaliskuussa, jolloin Litecoinin kurssi nousee hetkellisesti yli 180 euroon, mutta lähti pian nousun jälkeen takaisin laskusuhdanteeseen. Elokuun lopussa Litecoinin hinta on asettunut noin 50 euron paikkeille, joka tarkoittaa yli 80 prosentin arvon häviämistä.

Kuviossa 36 nähdään SADF-testin perusteella aikamerkitty hintakuplat, jotka painottuvat vuoteen 2017 ja 2018. Tutkielman kannalta relevantit hintakuplat ovat kuitenkin yli kuuden päivän mittaisia, mikä poistaa aikamerkinnästä lyhyet hintakuplat. SADF-testi havaitsee Litecoinin aikasarjassa vain yhden hintakuplan, joka ylittää 6 päivän keston.



Kuvio 36 Litecoin SADF-aikamerkintä

Hintakupla on aikavälillä 21.4.2017–21.5.2018 ja kestää 396 päivää eli yli vuoden. Voidaan havaita, että SADF-testin teho on Litecoinin kohdalla melko heikko GSADF-testiin, joka havaitsi 7 yli 6 päivän hintakuplaa erillisinä. SADF-testissä hintakuplat ikään kuin niputtuvat yhteen, jotka GSADF on arvioinut neljäksi erilliseksi hintakuplaksi.

5.8 Dollarin eurokurssi

5.8.1 Kriittiset arvot ja testitulos

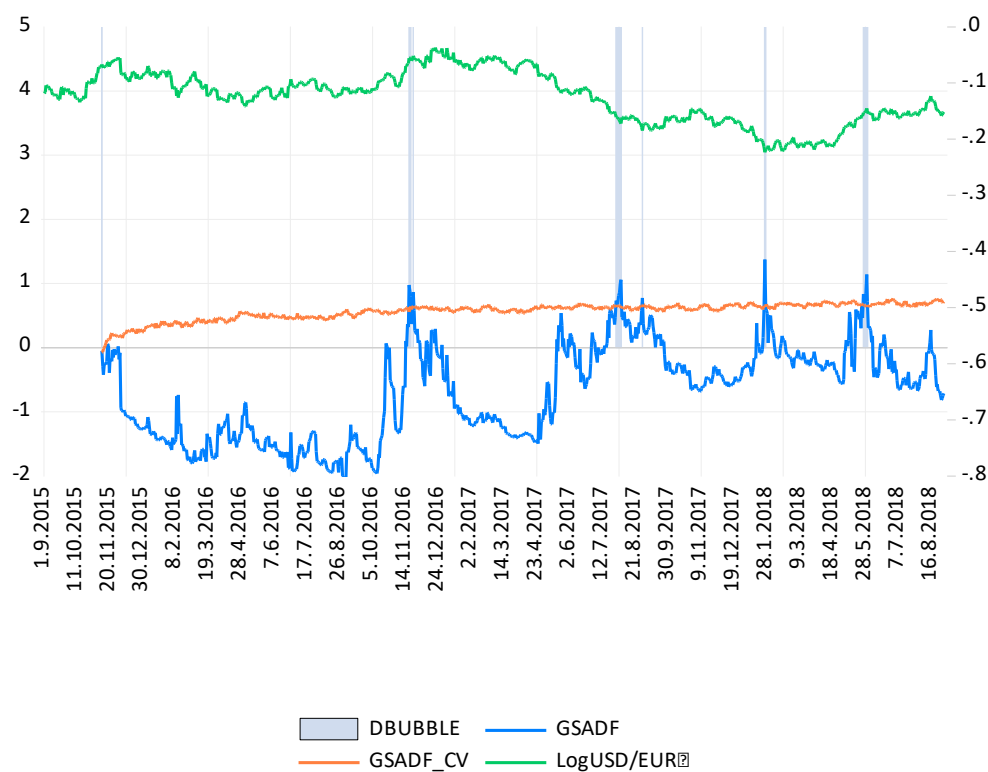
Dollarin eurokurssin aikasarja sisältää 1096 havaintoa ja GSADF-testi suoritetaan kiinteällä viiveellä $k = 0$. GSADF-testin tulos näkyy taulukossa 19 ja huomataan, että se on alle kriittisten arvojen kaikilla merkitsevyystasoilla. Testin perusteella ei aikasarjasta löydy tilastollisesti merkitseviä hintakuplia aikaväliltä 2015–2018. Testitulos oli odotettu, sillä kurssin kehitys on ollut melko tasaista viime vuodet. Minimi ajanjaksolla oli absoluuttisia hintoja tarkasteltaessa 0,800 ja maksimi 0,964.

Taulukko 19 GSADF- ja SADF-testitulos USD/EUR

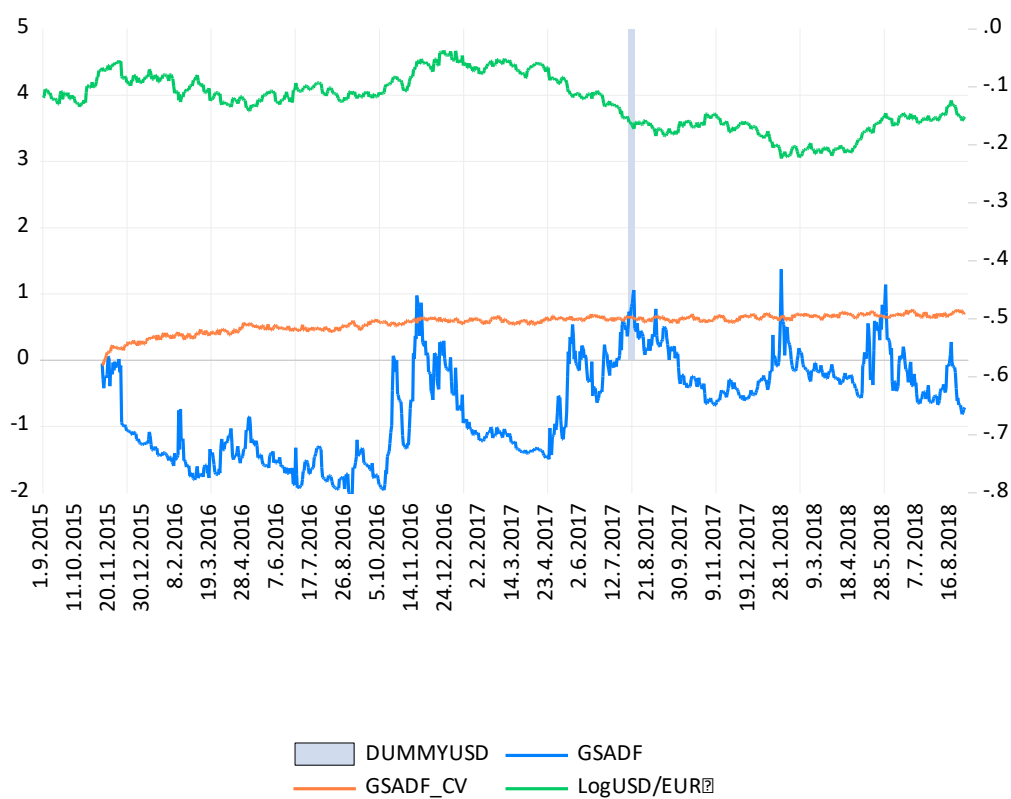
	GSADF	SADF
Testitulos	1,373	-0,049
99 %	2,924	2,062
95 %	2,362	1,593
90 %	2,123	1,273

Taulukossa 19. nähdään myös SADF-testin tulos, joka on linjassa GSADF-testin tuloksen kanssa ja nollahypoteesia yksikköjuuresta ei voida hylätä. Aikasarja ei näytä merkkejä räjähdysmäisestä prosessista.

Kun tarkastellaan aikamerkintää BSADF-testillä, huomataan että aikasarjassa on kuusi ajankohtaa, missä BSADF-arvo ylittää kriittisen arvon. Tulokset eivät kuitenkaan ole tilastollisesti merkitseviä.



Kuvio 37 GSADF USD/EUR



Kuvio 38 Hintakuplat USD/EUR (>6 päivää)

Kun huomioidaan yli kuuden päivän hintakuplat (Kuvio 38), jotka ovat tutkielman kannalta relevantteja, huomataan, että hintakuplia on vain yksi kappale aikavälillä 28.7.2017–3.8.2017. Tulos ei ole kuitenkaan tilastollisesti merkitsevää. Hinnan muutokset aikavälillä ovat pieni noin 0,01 euron luokkaa.

5.9 Tulosten robustisuus

Robustisuuden testaamiseksi tutkielmassa on GSADF-testin lisäksi tehty SADF-testi kaikille muuttujille ja pyritty vertaamaan testien tehoa keskenään. Voidaan myös havainnoida, onko GSADF-testi toiminut hintakuplien havaitsemisessa paremmin. Bitcoinista on tarkasteluun otettu myös pidempi ajanjakso 2013–2018, jotta nähdään poikkeavatko GSADF-testin havaitsema hintakuplat lyhyemmästä ajanjaksosta. Samalla mukaan on saatu tutkielman kannalta mielenkiintoinen ajanjakso 2013–2015.

Kryptovaluuttoihin liittyvä data on kerätty coinmarketcap.com-sivustolta, jolloin otettava huomioon, että tutkielmaan sisältyy riski datan oikeellisuudesta. Sivustolla on mainittu, että tiedon oikeellisuus pyritään varmistamaan, mutta sivusto ei ota vastuuta puutteellisesta tai väärästä tiedosta ja datan käyttäjä kantaa itse riskin datan oikeellisuudesta. (coinmarketcap.com 2018.) Kuitenkin sivustolla käytettävän laskentamenetelmä on arvioitu ennen datan käyttöä ja se nähdään luotettavana vaihtoehtona tutkielman kannalta. Kryptovaluutoista on saatavilla dataa hyvin rajallisesti, joten coinmarketcap.com on arvioitu kaikista luotettavimmaksi lähteeksi. Coinmarketcap.com-sivuston keräämiä tietoja on käytetty useissa kryptovaluuttoja käsittelevissä tutkimuksissa, kuten Hayesin (2017) kryptovaluuttojen hinnanmuodostusta koskeva tutkimus ja Fry & Cheah (2016) tutkimus negatiivisista hintakuplista kryptovaluutoissa.

Coinmarketcap.com-sivustolla käytettävässä laskentamenetelmässä on otettu huomioon satojen eri kryptovaluuttamarkkinatarjoajien hinnat ja laskettu niistä painotettu keskihinta. Laskennassa ei ole otettu huomioon ilman välityspalkkioita toimivia markkinatarjoajia, sillä kyseisten markkinatarjoajien vaihdannan voi vääristyä sijoitusroboteista johtuen. Kryptovaluutan on oltava kaupankäynnin kohteena julkisilla markkinoilla vähintään 30 päivää, jotta se otetaan huomioon sivustolla. Tutkielmassa käytettävien kryptovaluuttojen kohdalla sivusto on käyttänyt laskennassa 400 eri markkinatarjoajan hintoja. Lokakuussa 2018 sivustolla on listattu tietoa yli 2000 eri kryptovaluutasta ja sivusto tarjoaa myös maksullisia API *'application programming interface'*-palveluita järjestelmien kehittäjille ja yritysten käyttöön, joiden avulla käyttäjä saa kryptovaluutoista tietoja ja alustan datan analysointiin. (coinmarketcap.com 2018.)

Viivetermien oikean määrän valinta on haasteellinen tutkielman kannalta. Usein viivetermien määrän valinnassa voidaan hyödyntää datan frekvenssiä, eli valitaan 12 vii-

vettä, jos esimerkiksi kuukausittaista dataa ja neljä viivettä, jos data on neljännesvuosit-
taista. Saman soveltaminen päiväkohtaiseen dataa ei kuitenkaan ole mahdollista. Toinen
vaihtoehto on käyttää informaatiokriteereitä viivetermien määrän valintaan, jossa valitaan
viivetermien määrä minimoimalla informaatiokriteeriä. Joka tapauksessa tuloksen herk-
kyys viivetermien määrään on hyvä ottaa huomioon. Liian pieni viivetermien määrä ei
poista autokorrelaatiota ja voi vääristää testin tuloksia, kun taas liian suuri määrä viiveitä
voi vähentää testin tehoa, jolloin esimerkiksi yksikköjuuritestissä stationaariselle aikasar-
jalle nollahypoteesi yksikköjuuresta hylätään harvemmin. (Brooks 2002, 363.)

GSADF-testi suoritettiin aikasarjoille kiinteällä viivetermillä 0, joka oli Phillips ym.
(2015) tutkimuksen mukaan paras valinta GSADF-testille. AIC- tai BIC-kriteerit eivät
heidän laajojen testiensä mukaan tuota hyviä tuloksia GSADF-testin kohdalla. GSADF-
testin kohdalla liian suuret viivetermien määrät voivat johtaa ylisuuriin testituloksiin,
jotka vääristävät tuloksia ja vähentävät testin tehoa. Viivetermien lisääminen vaatii myös
enemmän regressioita ja tarvittava konetehon määrä on suuri. Tutkielman kannalta on
kuitenkin hyvä tiedostaa tulosten riippuvaisuus testissä käytettyjen viivetermien määrän
kannalta. Viivetermien vähäisyys voi johtaa virhetermien liian suureen autokorrelaatioon
regressiossa, eikä tulosten herkkyyttä viivetermien määrään ole testattu tässä tutkiel-
massa.

Oikean regressiomallin valinta GSADF-testiin on merkittävää testin kannalta. Regres-
siomalli vaikuttaa sekä GSADF-testin tuloksiin, että simuloituihin kriittisiin arvoihin.
Tutkielmassa seurattiin Phillips ym. (2015) tutkimusta ja regressiomallissa otettiin huo-
mioon vakiotermi. Vakion ja trendin sisällyttäminen olisi tehnyt mallista empiirisesti epä-
realistisen, kun taas niiden pois jättäminen kokonaan olisi voinut aiheuttaa nollahypotee-
sin turhaa hylkäämistä. On kuitenkin otettava huomioon regressiomallin valinnan mah-
dolliset vaikutukset saatuihin tuloksiin.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkielmassa pyrittiin selvittämään, onko kryptovaluuttakursseissa havaittavissa hintakuplia ekonometrisin menetelmin ja onko näiden hintakuplien ennakointi mahdollista. Tutkielmassa käytettiin rullaavaa ja itseään toistavaa oikeahäntäistä yksikköjuuritestiä, sillä sen on todettu havaitsevan erityisen tehokkaasti useita peräkkäisiä hintakuplia aikasarjassa ja se sopii näin erityisesti kryptovaluuttojen tarkasteluun. Hintakuplien alkamis- ja päättymispäivät aikamerkittiin vertaamalla testituloksia Monte Carlo -simulaatiolla laskettuihin kriittisiin arvoihin eri ajanjaksoina. GSADF-testi havaitsee hintakuplia hinta-aikasarjoista, jolloin testi soveltuu kryptovaluuttojen tarkasteluun, joiden fundamentaalista arvoa on vaikea määrittää. Tutkielman tuloksissa on tarkasteltu myös ajanjaksojen aikaisia tapahtumia, jotka ovat voineet vaikuttaa hintojen radikaaleihin muutoksiin.

GSADF-testin tuloksia tarkastellessa voitiin havaita, että testi on tehokkaasti merkanut log-hintojen aikasarjadataan radikaaleja nousuja ja sitä seuranneita laskuja. GSADF-testi ei erota hinnan nousujen taustalla tapahtuvia fundamentaaliseen hintaan vaikuttavia seikkoja, vaan testaa aikasarjan ekonometristen ominaisuuksien kautta hintakuplien olemassaoloa. GSADF-testin mukaan Bitcoinin, Ethereumin ja Litecoinin aikasarjoissa on havaittavissa useita peräkkäisiä hintakuplia. Tulokset ovat tilastollisesti merkitseviä 99 prosentin merkitsevyystasolla. Hintakuplat ajoittuivat testin perusteella erityisesti vuoden 2017 ja merkittävin hintakupla havaitaan 2017–2018 vuodenvaihteessa, joka tunnetaan myös nimellä *'the great crypto crash'*.

Merkittävimmän 2017–2018 hintakuplan puhkeaminen on tapahtunut Bitcoinissa, Ethereumissa ja Litecoinissa lähes päivälleen samaan aikaan, joka tukee empirian tulosta kryptovaluuttojen korkeasta korrelaatiosta keskenään. Vuoden 2017 voidaan nähdä olleen merkittävä kryptovaluuttojen kannalta, koska ajanjakson aikana kryptovaluutat alkoivat saada jalansijaa sijoituskohteena muiden vaihtoehtoisten sijoitusten joukossa ja hinnat lähtivät nousuun. Lisäksi lohkoketjuteknologian hyödyntäminen alkoi kiinnostaa pankkeja ja muita toimialoja. (J.P. Morgan 2018.) Seurauksena oli kuitenkin myös spekuloinnin ja vaihdannan volyymin selvä lisääntyminen markkinoilla, jonka voidaan nähdä vauhdittaneen hinnan nousua ja johtaneen hintakuplan syntyyn.

Testin perusteella pystytään ennakoimaan hintakuplan kestoja, joten oikea-aikainen poistuminen markkinoilta, ennen hintakuplan lopullista romahtamista, on haastavaa. Testin merkitsemän hintakuplan päättymisajankohdan aikana ei aina havaittu radikaalia romahtamista, vaan jo ennen hintakuplan päättymispäivää kurssi on lähtenyt laskuun. Tässä kohtaa sijoittajan maksimaalinen tuotto olisi saavutettu hintakuplan huipulla myydessä. GSADF-testi havaitsi myös useita lyhyitä hintakuplia, joiden aikana reagointi ei olisi ollut kannattavaa, sillä kurssi on palannut pian notkahduksen jälkeen ennalleen tai jopa noussut. Empiriassa huomataan, että GSADF-testi havaitsee useita peräkkäisiä hintakuplia SADF-testiä tehokkaammin, vaikka testien tulokset tukevatkin toisiaan suurelta osin.

Hintakuplan romahtaminen oli jokaisen kryptovaluutan kohdalla suurin vuoden 2017–2018 välillä. Suurimpana syynä hintakuplan romahdukseen on pidetty Kiinan sääntelyn vahvistumista. Hintakuplan romahtamisen taustalla on lisäksi nähty Bitcoinin futuurien tulo markkinoille alkuvuodesta 2018, joka lisäsi spekulointia ja nosti hintoja pisteeseen, joka aiheutti lopullisen romahduksen. (Becker 2018.) Voidaan tulkita, että alkujaan perusteltu hinnan nousu on johtanut spekuloinnin tuloon markkinoille ja tätä kautta hintakuplaan, joka rakentui sijoittajien odotuksille tulevista voitoista.

Bitcoinin pidemmän aikasarjan 2013–2018 ajalta havaittiin GSADF-testillä myös toinen merkittävä hintakupla 2013–2014 vuodenvaihteessa. Cheung ym. (2015) havaitsivat myös GSADF-menetelmällä hintakuplan 5.11.2013–18.2.2014, joka on linjassa tutkielman havaitsemien kahden ensimmäisen hintakuplan kanssa. Tässä tutkielmassa on kuitenkin havaittu kaksi erillistä hintakuplaa ajanjaksolta. Eroavaisuudet voivat johtua myös siitä, että Cheung ym. (2015) datana on käytetty Mt. Gox pörssin hintoja. Corbet ym. (2018) havaitsivat myös saman hintakuplan Bitcoinin aikasarjassa vuodenvaihteen 2013–2014 aikana, joten näyttöä hintakuplan olemassaolosta löytyy myös muista tutkimuksista. hintojen nousun taustalla oli kasvanut kiinnostus kryptovaluuttoja kohtaa, sekä viranomaisten positiivinen suhtautuminen lohkoketjuteknologian kehittämiseen. (Corbet 2018.) Hintakupla kuitenkin romahti 2014, kun Kiinan keskuspankki alkoi sääntelemään rankemmin kryptovaluuttapörsssejä ja rajoittamaan valuutan käyttöä (Wheatley ym. 2018, 8–9). Taustalla vaikutti myös ajanjakson suurimpaan kryptovaluuttapörssiin Mt. Goxiin tehty tietomurto, jossa hävisi 450 miljoonan edestä käyttäjien kryptovaluuttaa ja, jota seurasi pörssin hakeutuminen konkurssiin (Cheung ym. 2015 ja Stowe 2014).

USD/EUR-kurssissa ei havaita hintakuplia ajanjaksolla, mikä oli odotettavaa, sillä kurssin kehitys on ollut tasaista viimeiset kolme vuotta. USD/EUR-kurssin ja kryptovaluuttojen välillä havaittiin vähäistä positiivista korrelaatiota, mutta se ei ollut tilastollisesti merkitsevää. Tutkittava aikasarja jäi USD/EUR-kurssin kohdalta lyhyeksi, sillä hintakuplan merkkejä oltaisiin voitu havaita esimerkiksi finanssikriisin ajalta. Kuitenkin vertailukohtana nähdään, että oikean valuutan kohdalla hintakuplat näyttävät olevan yleensä harvinaisia poikkeuksia, kun taas kryptovaluuttojen kohdalla ne ovat jatkuvasti esiin nousevia. Tammikuun 2017 ja tammikuun 2018 välillä USD/EUR-kurssissa on havaittavissa lievä laskuperiodi. Havainto on mielenkiintoinen, sillä sama aikaperiodi on kryptovaluuttojen kohdalla ollut nouseva, mikä viittaisi mahdollisuuteen käyttää kryptovaluuttoja suojaustarkoituksessa. Samaan viittaa USD/EUR-kurssin ja kryptovaluuttojen välinen alhainen korrelaatio.

Tutkielman teoriaosuus pyrki selvittämään kryptovaluutan roolia sijoituskohteena, niiden taustalla toimivaa lohkoketjuteknologiaa, hintakuplien teoriaa sekä tilastollista mallintamista. Aiheesta ei kryptovaluuttojen näkökulmasta ole juurikaan tutkimusta, joten

tutkielman kautta kryptovaluuttoihin liittyvän aihepiirin jäsentyminen ja empiirisen tarkastelun yhdistäminen teoriaan on arvo jo itsessään ja tuo lisäarvoa mahdollisiin jatko-tutkimuksiin.

Tutkielmassa hintakuplia tutkittiin rationaalisen hintakuplan näkökulmasta, jossa rationaaliset sijoittajat maksavat ylihintaa odottaen hinnan nousun jatkuvan seuraavassa periodissa, ja jonka seurauksena markkinahinta voi erota sijoituskohteen fundamentaalisesta arvosta. (Blanchard & Watson 1982.) Rationaalisen kuplan teoria perustuu siihen, että sijoittaja uskoo pystyvänsä poistumaan markkinoilta ennen hintakuplan puhkeamista. (Taipalus 2012). Tutkielman kannalta nousi kuitenkin ilmeiseksi myös psykologisten tekijöiden vaikutukset hinnan nousuihin ja laskuihin kryptovaluuttojen kohdalla, joten käyttäytymistaloustieteellinen tutkimus soveltuisi hinnan muutosten tarkasteluun. Lauma-ajattelu, jossa osa sijoittajista nojaa sijoituspäätöksissään muiden sijoittajien toimintaan voi johtaa epärationaalisen hintakuplan syntyyn. (Shiller 2000, 148–152.)

Kryptovaluuttojen kohdalla arvonmääritys on erityisen haastavaa, koska toimivia malleja ei tunneta. Voidaankin olettaa, että valtaosa sijoittajista on tehnyt päätöksensä spekuloiden tulevaisuuden hintoja ja muiden sijoittajien toimintaa seuraten. Hintojen nousun taustalla on ollut myös odotuksia uuden teknologian laajemmasta käyttöönotosta ja sen tuomista mahdollisuuksista. Blanchard ja Watson (1982, 8–9) toteavat, että hintakuplat syntyvät usein markkinoille, joissa arvonmääritys on haastavaa. Heidän mukaansa fundamentaalien ollessa monimutkaisia keskimääräinen sijoittaja tekee päätöksensä keskimääräisten historiallisten tuottojen mukaan. Kryptovaluuttamarkkinat tarjoavat otollisen ympäristön hintakuplien syntymiselle ja sitä tukee myös tämän tutkielman empiirinen osuus. Kryptovaluutat ovat sijoituskohteena edelleen uusia ja teoriaa niiden fundamentaalien arvonmääritykseen ei vielä ole kehitetty tarpeeksi. Kryptovaluutoista ei makseta osinkoa, joten osinkoperusteinen arvonmääritys ei ole mahdollista. Voidaan olettaa, että tulevaisuudessa kryptovaluuttojen kaltaiset digitaaliset omaisuuserät tulevat lisääntymään, joten arvonmääritykseen on löydettävä keinoja.

7 YHTEENVETO

Hintakuplien tutkiminen ja erityisesti tilastollinen mallintaminen on tärkeää, jotta kriisien aiheuttamilta kustannuksilta voitaisiin välttyä. Hintakuplien ennakointi on haasteellista ja niiden havaitseminen tapahtuu usein sen ollessa jo liian myöhäistä. Vuodenvaihte 2017–2018 oli kryptovaluuttojen kannalta merkityksellinen hintojen radikaalin nousun ja sitä seuraavan romahduksen takia, jonka seurauksena hintakuplista kryptovaluutoissa alettiin puhua yhä enemmän. Viranomaisten kiinnostus arvioida rahatalouden ja kryptovaluuttojen välisiä yhteyksiä lisääntyi. Kiinnostuksen kohteena oli lisäksi luoda sääntely, joka minimoisi rikollisen toiminnan kryptovaluutoilla, suojaisi sijoittajaa ja estäisi kryptovaluuttamarkkinoiden epävakauden leviämisen globaaliin rahatalouteen.

Tutkielmassa tarkastellaan Bitcoinin, Ethereumin ja Litecoinin aikasarjoissa esiintyviä hintakuplia aikaväliltä 2015–2018 oikeahäntäisen yksikköjuuritestin avulla. Tutkielma sisältää myös pidemmän analyysin Bitcoinin osalta, joka on aikaväliltä 2013–2018. Vertailukohtana tutkielmassa on myös USD/EUR-aikasarja ja siinä esiintyvät hintakuplat. Tutkielmassa pyritään selvittämään, löytyykö kryptovaluuttojen aikasarjoista hintakuplan merkkejä ja voidaanko näitä hintakuplia ennakoida. Tutkielmassa tarkastellaan myös hintakuplien taustalla vaikuttavia tapahtumia ja selitetään niiden vaikutusta hinnan muutokseen, jotta voidaan arvioida ovatko hinnan muutokset hintakuplista johtuvia.

Viime vuosina tilastolliset tutkimusmenetelmät ovat kehittyneet ja useiden peräkkäisten hintakuplien havaitsemiseen tehokkaaksi menetelmäksi on todettu GSADF-testi. Testi on perinteisen ADF-testin oikeahäntäinen versio, jossa testi tehdään lisäksi itseään toistaen ja rullaavasti eteenpäin. Menetelmä havaitsee tehokkaasti useita hintakuplia aikasarjassa, sillä testiä ei tehdä vain kerran koko aikasarjalle. Menetelmässä nollahypoteesina on yksikköjuuri, mutta mielenkiinto on erityisesti vastahypoteesissa eli ”räjähdysmäisessä” prosessissa, jolla pyritään havaitsemaan arvon poikkeamista fundamentaalisesta arvostaan hintasarjan ekonometristen ominaisuuksien kautta. Jos nollahypoteesi yksikköjuuresta hylätään, aikasarja on epästationaarinen ja siihen vaikuttavat shokit vahvistuvat ajan myötä, joka voidaan tulkita hintakuplaksi aikasarjassa. Hintakuplien aikamerkintään käytetään BSADF-menetelmää, jossa taaksepäin lasketun GSADF-testin tuloksia verrataan Monte Carlo -simulaatiolla saatuihin kriittisiin arvoihin eri ajankohtina, jolloin nähdään hintakuplan päättymis- ja alkamisajankohta.

GSADF-testin perusteella havaitaan hintakuplan merkkejä Bitcoinin, Ethereumin ja Litecoinin aikasarjoissa, ja aikamerkintä osoittaa, että hintakuplia on ollut useita aikavälillä 2015–2018 sekä Bitcoinin pidemmässä aikasarjassa aikavälillä 2013–2018. USD/EUR-kurssin aikasarjassa ei havaita ainuttakaan hintakuplaa aikavälillä 2015–2018. Kryptovaluuttojen kohdalla hintakuplia esiintyy erityisesti 2017, jolloin on nähty suurin

hintojen nousu kaikissa kryptovaluutoissa. GSADF-testi havaitsee tehokkaasti ajanjaksoja, jolloin hinta on noussut radikaalisti ja romahtanut lopulta ja testi toimisi aikaisena varoitusjärjestelmänä kryptovaluutoissa esiintyville hintakuplille.

Hintakuplien taustalta löytyy tapahtumia ja tekijöitä, joiden voidaan arvioida vaikuttavan kryptovaluuttojen fundamentaaliseen arvoon, kuten lohkoketjuteknologian kehittymiseen ja kryptovaluuttojen laajempiin käyttömahdollisuuksiin maksuvälineenä. Hintojen laskuun on vaikuttanut esimerkiksi sääntelyn lisääntyminen markkinoilla ja tietomurrot kryptovaluuttoja välittäneisiin pörssiin. Tutkielman perusteella kuitenkin voidaan päätellä hintareaktioiden olleen suurimmassa osassa hintakuplia niin voimakkaita, että sijoittajien spekulatiolla on osuutta hintojen nousuun yli fundamentaalisen tason, eivätkä tapahtumat yksinään selitä vuodenvaihteen 2017–2018 kaltaista hinnan nousua ja sitä seurannutta romahdusta.

Kryptovaluuttoihin liittyvää tutkimusta on edelleen melko vähän ja fundamentaalisen hinnan määrittämiseen ei ole löydetty luotettavia keinoja. Kryptovaluuttojen arvonmäärittämiseen tarvitaan uusia menetelmiä, jotta hintojen muutoksia voitaisiin tutkia ja analysoida paremmin.

LÄHTEET

- Allen, Franklin – Gale, Douglas (2000) Bubbles and crises. *Economic Journal*, Vol. 110 (460), 236.
- Antonopoulos, Andreas M. (2015) *Mastering Bitcoin: Unlocking Digital Cryptocurrencies*. 2. uud. p. O'Reilly Media, CA.
- Aggarwal, Divesh – Brennen, Gavin – Lee, Troy – Santha, Miklos – Tomamichel, Marco (2017) Quantum attacks on Bitcoin, and how to protect against them. <<https://arxiv.org/abs/1710.10377v1>>, haettu 12.11.2018.
- Badev, Anton – Chen, Matthew (2014) Bitcoin: Technical background and data analysis. <<https://www.federalreserve.gov/econresdata/feds/2014/files/2014104pap.pdf>>, haettu 7.11.2018.
- Beck, Roman – Avital, Michel – Rossi, Matti – Bennett Thatcher, Jason. (2017) Blockchain technology in business and information systems research. *Business & Information Systems Research*. Vol. 57 (6), 381–384.
- Becker, Christopher (2018) Bitcoin rising. *Strategic Finance*, Vol. 99 (12) 15–16.
- Beckmann, Joscha – Glycopantis, Dionysius – Pilbeam, Keith (2018) The dollar-euro exchange rate and monetary fundamentals. *Empirical Economics*, Vol. 54 (4) 1389–1390.
- Bentov, Iddo – Lee, Charles – Mizrahi, Alex – Rosenfeld, Meni (2014) Proof of Activity: extending Bitcoin's Proof of Work via Proof of Stake. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, Vol. 42 (3) 5–6.
- Bettendorf, Timo – Chen, Wenjuan (2013) Are there bubbles in Sterling-Dollar exchange rate? New evidence from sequential ADF tests. *Economics Letters*, Vol. 120 (2), 350–353.
- Bernanke, Ben (2013) Board of Governors of the Federal Reserve System letter. <<https://www.documentcloud.org/documents/835843-virtual-currency-hearings.html>>, haettu 16.11.2018.

- Blanchard, Olivier – Watson, Mark (1982) Bubbles, rational expectations and financial markets. *Working paper*, Cambridge.
- Blau, Benjamin (2018) Price dynamics and speculative trading in Bitcoin. *Research in International Business and Finance*, Vol. 43, 15–21.
- Bloomberg.com (2018a) Crypto's 80% plunge is now worse than the dot-com crash. <<https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-09-12/crypto-s-crash-just-surpassed-dot-com-levels-as-losses-reach-80>>, haettu 3.11.2018.
- Bloomberg.com (2018b) Coincheck says it lost crypto coins valued at about \$400 million. <<https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-01-26/cryptocurrencies-drop-after-japanese-exchange-halts-withdrawals>>, haettu 6.11.2018.
- Blume, Lawrence E. – Bray, Margaret M. – Easley, David (1981) Introduction to the stability of rational expectations equilibrium. *Journal of Economic Theory*, Vol. 26, 313–314.
- Box, George E. – Jenkins, Gwilym M. – Reinsel, Gregory C. – Ljung, Greta M. (2016) *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5th edition. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Brooks, Chris (2002) *Introductory Econometrics for Finance*, 3th edition. Cambridge University Press, UK.
- Buterin, Vitalik (2013) Ethereum White Paper. <<https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper>>, haettu 1.3.2018.
- Buterin, Vitalik (2016) Ethereum research update. <<https://blog.ethereum.org/2016/12/04/ethereum-research-update/>>, haettu 16.11.2018.
- Böhme, Rainer – Cristin, Nicolas – Edelman, Benjamin – Moore, Tyler (2015) Bitcoin: economics, technology, and governance. *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 29 (2) 222.
- Campbell, John – Perron, Pierre (1991) Pitfalls and opportunities: What Macroeconomists should know about Unit Roots. *NBER Macroeconomics annual 1991*, MIT Press.
- Caspi, Itamar (2013) *Rtadf: Testing for bubbles with EViews*, Bank of Israel, Research Department.

- Chaum, David (1982) Blind signatures for untraceable payments. <http://www.hit.bme.hu/~buttyan/courses/BMEVIHIM219/2009/Chaum.Blind-SigForPayment.1982.PDF>, haettu 9.11.2018.
- Cheung, Adrian – Roca, Eduardo – Su, Jen Je (2015) Cryptocurrency bubbles: An application of the Phillips-Shi–Yu (2013) methodology on Mt. Gox bitcoin prices. *Applied Economics*, Vol. 47 (23) 2348, 2352–2353, 2356.
- Chohan, Usman W. (2017) Initial coin offerings (ICOs): Risks, regulation, and accountability. *Discussion paper series: Notes on the 21st century*. University of New South Wales, Canberra.
- Ciaian, Pavel – Rajcaniova, Miroslava – Kancs, d’Artis (2016) The economics of Bitcoin price formation. *Applied Economics*, Vol. 48 (19) 1801, 1813–1814.
- CoinDesk.com (2017a) Litecoin’s SegWit activation: Why it matters and what’s next. <https://www.coindesk.com/litecoins-segwit-activation-why-it-matters-and-whats-next/>, haettu 9.11.2018.
- CoinDesk.com (2017b) China’s ICO Ban: A full translation of regulators remarks. <https://www.coindesk.com/chinas-ico-ban-a-full-translation-of-regulator-remarks/>, haettu 9.11.2018.
- Coinmarketcap.com <https://coinmarketcap.com/all/views/all/>, haettu 22.1.2017.
- Corbet, Shaen – Lucey, Brian – Yarovaya, Larisa (2018) Datestamping the Bitcoin and Ethereum bubbles. *Finance Research Letters*, Vol. (26) 81–84, 86–87.
- Crosby, Michael – Nachiappan – Pattanayak, Pradan – Verma, Sanjeev – Kalyanaraman, Vignesh (2016) Blockchain technology: Beyond Bitcoin. *Applied Innovation Review*, (2) 9–10, 12.
- Diba, Behzad – Grossman, Herschel (1988a) Explosive rational bubbles in stock prices. *American Economic Review*, Vol. 78 (3) 520–521, 523, 529.
- Diba, Benzad – Grossman, Herschel (1988b) Rational Inflationary Bubbles. *Journal of Monetary Economics*, Vol. 21 (1) 36–37.

- Dickey, David – Fuller, Wayne (1979) Distribution of the estimators for autoregressive time series with unit root. *Journal of American Statistical Association*, Vol. 74 (366) 427.
- Diffie, Whitfield – Hellman, Martin (1976) New directions in cryptography. *Invited Paper*. Stanford University, CA.
- Diks, Cees – Hommes, Cars – Wang, Juanxi (2018) Critical Slowing Down as an Early Warning Signal for Financial Crises? *Empirical Economics*, pages 1–28.
- ECB (2018) Virtual or virtueless? The evolution of money in the digital age. <<https://www.ecb.europa.eu/press/key/date/2018/html/ecb.sp180208.en.html>>, haettu 2.11.2018.
- Evans, George (1991) Pitfalls in Testing for Explosive Bubbles in Asset Prices. *The American Economic Review*, Vol. 81 (4) 922–924.
- Eyal, Ittay – Sirer, Emin Gün (2018) Majority is not enough: Bitcoin mining is vulnerable. *Communications of the ACM*, Vol. 61 (7) 95–102.
- Fama, Eugene (1970) Efficient Capital Markets: A Review of Theory and Empirical Work. *The Journal of Finance*, Vol. 25 (2) 383.
- Fiva (2017) Finanssivalvonnan varoitus: Kryptovaluutat ja ICOt (Initial Coin Offering) riskialttiita sijoituskohteita. <http://www.finanssivalvonta.fi/fi/Tiedotteet/Lehdistotiedotteet/Pages/17_2017.aspx>, haettu 19.3.2018.
- Financial Times (2014) Bitcoin faces fresh hurdle as Alibaba bans its use. <<https://www.ft.com/content/af021250-783e-11e3-a148-00144feabdc0>>, haettu 16.11.2018.
- Finanssivalvonta (2018) Virtuaalivaluuttoihin liittyvien palvelun tarjoajille ehdotetaan sääntelyä ja rekisteröintiä Finanssivalvontaan. <http://www.finanssivalvonta.fi/fi/Tiedotteet/valtari/Pages/virtuaalivaluutat_092018.aspx#Otsikko2>, haettu 2.10.2018.
- Flood, Robert – Garber, Peter (1980) Market Fundamentals versus Price-Level Bubbles: The First Tests. *Journal of Political Economy*, Vol. 88 (4) 746, 762.
- Fry, John – Cheah, Eng-Tuck (2016) Negative bubbles and shocks in cryptocurrency markets. *International Review of Financial Analysis*, Vol. 47, 343–352.
- Fuller, Wayne (1976) *Introduction to statistical time series*. John Wiley & Sons, New York.
- Fuller, Wayne (1996) *Introduction to statistical time series*. 2. painos, John Wiley & Sons, New York.

- Garber, Peter (2000) *Famous first bubbles, The fundamentals of early manias*. The MIT Press, London.
- Green, Jerry R. (1975) *Information, Efficiency and Equilibrium*. Department of Economics, Harvard University, Cambridge.
- Glaser, Florian (2017) *Pervasive decentralization of digital infrastructures: A framework for blockchain enabled system and use case analysis*. Proceedings of the 50th International Conference on System Sciences. Goethe University Frankfurt.
- Goldwasser, Shafi (1997) New Directions in Cryptography: Twenty Some Years Later. *38th annual symposium on Foundations of Computer Science*, IEEE, 31.
- Gurkaynak, Refet (2005) *Econometric tests of asset price bubbles: Taking stock*. Division of monetary affairs board of governors of the federal reserve system, Washington DC.
- Hae-Young, Kim (2013) Statistical notes for clinical researchers: assessing normal distribution (2) using skewness and kurtosis. <<https://doi.org/10.5395/rde.2013.38-1.52>>, haettu 3.11.2018.
- Hanuliak, Ivan (2002) On the Analysis and Modelling of Computer Communication Systems. *Kybernetes*, Vol. 31 (5) 715–730.
- Harwick, Cameron (2016) Cryptocurrency and the Problem of Intermediation. *The Independent Review*, Vol. 20 (4) 570–574.
- Harrison, Michael – Kreps, David (1978) Speculative Investor Behavior in a Stock Market with Heterogeneous Expectations. *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 92 (2) 323–324.
- Hayes, Adam S. (2017) Cryptocurrency value formation: An empirical study leading to a cost of production model for valuing Bitcoin. *Telematics and Informatics*, Vol. 34 1308–1321.
- He, Dong – Habermeier, Karl – Leckow, Ross – Haksar, Vikram – Almeida, Yasmin – Kashima, Mikari – Kyriakos-Saad, Nadim – Oura, Hiroko – Saadi Sedik, Tahsin – Stetsenko, Natalia (2016) *Virtual Currencies and Beyond: Initial Considerations*. IMF Staff discussion note, International Monetary Fund.

- Hileman, Garrick – Rauchs, Michel (2017) Global blockchain benchmarking study. Cambridge Centre for Alternative Finance, University of Cambridge, United Kingdom.
- Homm, Ulrich – Breitung, Jörg (2012) Testing for speculative bubbles in stock market: A comparison of alternative methods. *Journal of Financial Econometrics*, Vol. 10 (1) 223.
- Hyvärinen, Hissu – Risius, Marten – Friis, Gustav (2017) A blockchain based approach towards overcoming financial fraud in public sector services. *The Business & Information Systems Engineering*, Vol. 59 (6) 18.
- Interpol (2015) Pharmaceutical Crime on the Darknet, A study of illicit online marketplaces. <<https://www.gwern.net/docs/sr/2015-interpol-pharmaceuticals.pdf>>, haettu 12.11.2018.
- J.P. Morgan (2018) Blockchain and the decentralization revolution: A CFO's guide to the potential implications of distributed ledger technology. <<https://www.jpmorgan.com/jpmpdf/1320745566550.pdf>>, haettu 1.10.2018.
- Keynes, John Maynard (1936) *The general theory of employment, interest and money*. Stellar Classics, England.
- Kindleberger, Charles – Aliber, Robert (2005) *Manias, Panics, and Crashes: A History of Financial Crises*, 5. uud. painos. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Kreuser, Jerome – Sornette, Didier (2018) Bitcoin bubble trouble. *Swiss Finance Institute Research Paper*, No. 18–24.
- Kristoufek, Ladislav (2013) *Bitcoin meets Google Trends and Wikipedia: Quantifying the relationship between phenomena of the internet era*. Institute of Economic Studies, Faculty of Social Sciences, Prague.
- Krugman, Paul (2013) Bitcoin's value is driven by the fact that it sounds impressive. <<https://www.businessinsider.com/paul-krugman-on-bitcoin-2013-12?r=US&IR=T&IR=T>>, 10.11.2018.
- Kuo Chuen, David Lee (2015) *Handbook of digital currency, Bitcoin, innovation, financial instruments, and big data*. Elsevier Inc. UK.

- Kuo Chuen, David Lee – Guo, Li – Wang, Yu (2018) Cryptocurrency: A New Investment Opportunity? *The Journal of Alternative Investments*, Vol. 20 (3) 15, 33.
- Lee, Charlie (2017) Litecoin price, tweets, and conflicts of interest. <https://www.reddit.com/r/litecoin/comments/7kzw6q/litecoin_price_tweets_and_conflict_of_interest/>, haettu 15.11.2018.
- LeRoy, Stephen – Porter, Richard (1981) The present-value relation: Tests based on implied variance bounds. *Econometrica*, Vol. 49 (3) 555–556.
- Li, Zheng-Zheng – Tao, Ran – Su, Chi-Wei – Lobont, Oana-Ramona (2018) Does Bitcoin bubble burst? <<https://link-springer-com.ezproxy.utu.fi/article/10.1007/s11135-018-0728-3>>, haettu 6.11.2018.
- Litecoin.info (2018) Litecoin. <<https://litecoin.info/index.php/Litecoin>>, haettu 9.11.2018.
- Litecoin.org (2018) The cryptocurrency for payments. <<https://litecoin.org/>>, haettu 17.9.2018.
- Lo, Stephanie – Wang, Christina (2014) *Bitcoin as money? Current Policy Perspectives*. No. 14–4, Federal Reserve Bank of Boston.
- Luther, William (2016) Bitcoin and the future of digital payments. *The Independent Review*, Vol. 20 (3) 399–402.
- Maniff, Jesse Leigh – Marsh, W Blake (2017) Banking on Distributed Ledger Technology: Can it Help Banks Address Financial Inclusion? *Economic Review* Vol. 102 (3) 55–61, 68–69.
- Massaro, Domenico (2012) *Bounded Rationality and Heterogenous Expectations in Macroeconomics*. Phd. thesis, University of Amsterdam.
- Metes, Dan (2005) *Visual, Unit Root and Stationarity Tests and Their Power and Accuracy*. Department of Mathematical and Statistical Sciences, University of Alberta, Edmonton.
- Mbiti Isaac – Weil David (2011) *Mobile Banking: The Impact of M-PESA in Kenya*. Working paper, National Bureau of Economic Research, Cambridge.
- Mooney, Christopher (1997) *Monte Carlo Simulation*. SAGE Publications, UK.

- Nakamoto, Satoshi (2008) A peer-to-peer electronic cash system. <<http://Bitcoin.org/Bitcoin.pdf>>, haettu 20.1.2017.
- Naseer, Mehwish – Tariq, Yasir (2015) The Efficient Market Hypothesis: A Critical Review of the Literature. *IUP Journal of Financial Risk Management*, Vol 12. (4) 48.
- Olleros, F. Xavier – Zhegu, Majlinda (2016) *Research handbook on digital transformations*. Edward Elgar Publishing, UK.
- Phillips, Peter – Magdalinos, Tassos (2007) Limit theory for explosively cointegrated systems. *Cowles Foundation discussion paper no. 1614*, Yale University.
- Phillips, Peter – Wu, Yangru – Yu, Jun (2011) Explosive behavior in the 1990s Nasdaq: When did exuberance escalate asset values? *International Economic Review*, Vol. 52, 7.
- Phillips, Peter – Shi, Shu-Ping – Yu, Jun (2014) Specification Sensitivity in Right-Tailed Unit Root Testing for Explosive Behavior. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, Vol. 76 (3) 316–320.
- Phillips, Peter – Shi, Shu-Ping – Yu, Jun (2015) Testing for Multiple Bubbles: Historical Episodes of Exuberance and Collapse in the S&P 500. *International Economic Review*, Vol. 56 (4) 1043–1055, 1057–1058.
- Pirjan, Alexandru – Petrosanu, Dana-Mihaela – Huth, Mihnea – Negoita, Mihaela (2015) Research issues regarding the Bitcoin and Alternative coins digital currencies. *Journal of Information Systems & Operations Management*. 1–2, 5–6.
- Radner, Roy (1979) Rational expectations equilibrium: Generic existence and the information revealed by prices. *Econometrica* Vol. 47 (3) 655.
- Rantala, Juho (2018) Lohkoketjuteknologian yhteiskunta, Osa I: Bitcoinista Ethereumiin. *Niin&Näin*, Vol. 96 (1) 48.
- Reyna, Ana – Martín, Cristian – Chen, Jaime – Soler, Enrique – Díaz, Manuel (2018) On blockchain and its integration with IoT. Challenges and opportunities. *Future generation computer systems*, Vol. 88, 174, 176, 178.

- Samuelson, Paul (1958) An Exact Consumption-Loan Model of Interest with or without the Social Contrivance of Money. *Journal of Political Economy*, Vol. 66 (6) 467–482.
- Savona, Paolo – Oldani, Chiara (2011) Global Financial Crisis: Global Impact and Solutions. Routledge, England.
- SEC (2018) Statement on potentially unlawful online platforms for trading digital assets. <<https://www.sec.gov/news/public-statement/enforcement-tm-statement-potentially-unlawful-online-platforms-trading>>, haettu 15.11.2018.
- Shapiro, Samuel – Wilk, Martin (1965) An Analysis of Variance Test for Normality (complete samples). *Biometrika*, Vol. 52 (3) 602.
- Shi, Shu-Ping (2013) Specification sensitivities in the Markov-switching unit root test for bubbles. *Empirical Economics*, Vol. 45 (2) 697–713.
- Shiller, Robert (1981) Do stock prices move too much to be justified by subsequent changes in dividends. *The American Economic Review*, Vol. 71 (3) 3–7.
- Shiller, Robert (2000) *Irrational Exuberance*. Princeton University Press, UK.
- Shiller, Robert (2017) Three questions: Prof. Robert Shiller on Bitcoin. <<https://insights.som.yale.edu/insights/three-questions-prof-robert-shiller-on-bitcoin>>, haettu 15.11.2018.
- Smith, Daniel (2002) Markov-switching and stochastic volatility diffusion models of short-term interest rates. *Journal of Business & Economic Statistics*, Vol. 20 (2) 8–10.
- Sørensen, Bent (2005) Economics 7395, Unit Roots. <<http://www.uh.edu/~bsorensen/u-root.pdf>>, haettu 26.10.2018.
- Stowe, Robert (2014) Bitcoin exits Mt. Gox and Heads to Wall Street. *Institutional Investor*. Euromoney Institutional Investor PLC, New York.
- Suomen Pankki (2014) Bitcoin involves risk. <<https://www.suomenpankki.fi/en/media-and-publications/news/2014/bitcoin-involves-risks/>>, haettu 21.1.2017.
- Taipalus, Katja (2013) Detecting asset price bubbles with time series methods. Edita prima. Helsinki.

- Taipalus, Katja (2013) Hintakuplista varoittavilla indikaattoreilla voidaan ennakoida makrovakautta uhkaavia kriisejä. *Kansantaloudellinen aikakauskirja*, Vol. 109 (1) 126–127.
- Takashima, Ikuya (2018) *Litecoin: The Ultimate Guide to the World of Litecoin*. CreateSpace, USA.
- Temin, Peter – Voth, Hans-Joachim (2004) Riding the South Sea Bubble. *The American Economic Review*, Vol. 94 (5) 1566, 1666.
- Tirole, Jean (1982) On the possibility of speculation under rational expectations. Vol. 50 (5) 1163, 1180.
- Tirole, Jean (1985) Asset Bubbles in Overlapping Generations. *Econometrica*, Vol. 53 (6) 1454–1457, 1466, 1467–1471, 1499.
- Tirole, Jean (2017) There are many reasons to be cautious about Bitcoin. *Financial Times* 30.11.2017.
- Tschorsch, Florian – Scheuermann, Björn (2016) Bitcoin and Beyond: A Technical Survey on Decentralized Digital Currencies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 18 (3) 2086–2093.
- US Patent & Trademark Office (2018) Systems and Methods for the Application of Distributed Ledgers for Network Payments as Financial Exchange Settlement and Reconciliation. <<http://appft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2&Sect2=HITOFF&u=%2Fnethtml%2FPTO%2Fsearch-adv.html&r=1&p=1&f=G&l=50&d=PG01&S1=20180121911.PGNR.&OS=dn/20180121911&RS=DN/20180121911>>, haettu 9.11.2018.
- Van Alstyne, Marshall (2014) Why Bitcoin has value? Evaluating evolving controversial digital currency. *Communications of the ACM*, Vol. 17 (5) 30–31.
- Vero.fi (2013) Virtuaalivaluuttojen tuloverotus. <https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/48411/virtuaalivaluuttojen_tuloverotu/>, haettu 2.3.2018.
- Vero.fi (2018) Virtuaalivaluuttojen verotus. <<https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/48411/virtuaalivaluuttojen-verotus/>>, haettu 13.7.2018.

- West, Kenneth (1987) A specification test for speculative bubbles. *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 102 (3) 555–561.
- Wheatley, Spencer – Sornette, Didier – Huber, Tobias – Reppen, Max – Gantner, Robert (2018) Are Bitcoin Bubbles Predictable? Combining a Generalized Metcalfe’s Law and the LPPLS Model. *Swiss Finance Institute research paper series nro. 18–22*, University of Geneva.
- White, Lawrence (2015) The Market for Cryptocurrencies. *Cato Journal*, Vol. 35 (2) 389–390.
- Williams, John (1938) *The Theory of Investment Value*. Harvard University Press, Cambridge.
- Yermack, David (2013) *Is Bitcoin a Real Currency? An Economic Appraisal*. NBER Working paper, Cambridge.
- Yli-Huumo, Jesse – Ko, Deokyoong – Park, Sooyong – Smolander, Kari (2016) Where is current research on blockchain technology? – A systematic review. *PLoS ONE*, Vol. 11 (10) 1–2.
- Zheng, Zipin – Xie, Shaoan – Dai, Hong-Ning – Chen, Xiangping – Wang, Huaimin (2018) Blockchain Challenges and Opportunities: A Survey. *International Journal of Web and Grid Services*, Vol. 14 (4), 354, 359–360.